

令和元年6月16日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2018

課題番号：26708022

研究課題名(和文) スピン反転励起の解明と広帯域色素増感太陽電池への応用

研究課題名(英文) Development of wideband dye-sensitized solar cells employing spin inversion transition

研究代表者

木下 卓巳 (KINOSHITA, Takumi)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：60635168

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)：本研究では、色素増感太陽電池の大幅な広帯域化を可能にするために、スピン反転励起のメカニズムを明らかにし、広帯域・超高効率色素増感太陽電池の実現へと展開するためのデバイス設計が行われた。分子軌道計算をベースに分子設計を行い、光吸収波長の拡張を実現した。新たな酸化チタンの表面修飾方法の開発により、色素増感太陽電池の外部機関での評価で世界最高の光電流値(30mAcm⁻²)を達成した。広帯域色素増感太陽電池と金属ハライドペロブスカイト太陽電池を組み合わせた多接合分光タンデム型太陽電池で21.5%のエネルギー変換効率の実現に成功した。当研究における数値目標を大幅に超える成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンの反転を伴う光学遷移はスピン禁制であるため通常観測されず、光エネルギー変換への応用の研究対象となる事はこれまで無かった。本研究課題では、スピン反転遷移の起源といった基礎的観点から実デバイスにおける広帯域光エネルギー変換の実証といった応用的観点まで幅広く研究を行った。その結果、スピン反転遷移を強く示す錯体色素の合成に成功し、開発著しい有機系太陽電池の分野において最高のエネルギー変換効率を達成した。またこれらスピン反転励起が可能な色素は、国際特許出願を行い製品化・販売された。このように、基礎化学的開拓のみにとどまらず、実社会への還元まで視野に入れた挑戦が研究成果に大きく結びついた。

研究成果の概要(英文)：In this research project, the mechanism of spin-inversion excitation was clarified to enable a significant expansion of the light absorption range by dye-sensitized solar cells, and device design was conducted to realize broadband and highly efficient dye-sensitized solar cells. Molecular designs of sensitizing dyes were obtained computationally to realize the extension of light absorption wavelength by sensitizing dyes. The development of a new method for the surface modification of TiO₂ has led to the achievement of the world's highest photocurrent value (30 mAcm⁻²). We succeeded in achieving 21.5% energy conversion efficiency in multi-junction solar cells by combining wideband dye-sensitized solar cells and metal halide perovskite solar cells. Results obtained were far beyond the initial numerical targets.

研究分野：光物理化学

キーワード：光エネルギー変換 太陽電池 色素増感 ペロブスカイト 光電気化学 Ru錯体 スピン軌道相互作用
多接合太陽電池

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的な CO₂ 排出量増加や脱化石資源の観点から再生可能エネルギーの利用拡大が求められている。そのような背景の中、光吸収材料に色素分子を用いた色素増感太陽電池(DSSC)の実用化が期待されている。DSSCは酸化チタン(TiO₂)ナノ粒子と光増感色素、ヨウ素電解液といった安価な材料を用い、色素の光吸収により生じた励起電子がTiO₂の伝導帯(CB)に注入され、酸化された色素がヨウ素レドックス対(I⁻/I₃⁻)により還元されることで光電変換を行う。われわれはこれまでに、ホスフィン配位子を有する特定のRu錯体で基底一重項から励起三重項へのスピン禁制となる遷移を許容にできることを見出し(スピン反転励起)、それをDSSCへと応用することにより従来では不可能だった~1000nmまでの高効率光電変換を実現した。通常のRu錯体では、可視光吸収によって生じた励起一重項状態はすぐに励起三重項状態へと項間交差を起こすため、このエネルギー差(スピン交換エネルギー)が内部転換による熱損失となるが、スピン反転励起を用いることによりこのロスを削減できることが特徴である。さらに、一重項状態へのスピン許容遷移に比べて低エネルギーに吸収帯が現れるため、近赤外光吸収にも有効に利用できる。スピン反転励起を用いた広帯域DSSCは世界中で注目を集めているが、基礎研究にまだいくつか未解明のことが残されており、また色素設計の最適化により更なる高効率化が期待される。

2. 研究の目的

本研究計画はスピン反転励起のまだ解明されていない基礎研究を行い、スピン反転励起を利用した超広帯域・高効率DSSCや高性能タンデム型太陽電池へと展開するための研究を行うことを目的としている。そこで本研究では、

- (1) スピン反転励起の遷移起源に関わる各種物性パラメーターを決定し、スピン反転励起の発現メカニズムを明らかにする。
 - (2) スピン反転励起の遷移エネルギーについて理論的に予測し、1000nmより長波長の光電変換が可能な構造を探索する。スピン軌道相互作用が関与する場合はエネルギーシフトが存在すると考えられる。理論的な計算にはスピン軌道相互作用を考慮した分子軌道計算を駆使した。
 - (3) スピン反転遷移の遷移確率向上に向けた分子設計を進める。(2)での理論的な計算を考慮し、大きな振動子強度を持つ分子構造について考察した。
 - (4) TiO₂への電子移動効率を向上させるためのTiCl₄による結晶成長と電荷分離効率の観測
 - (5) 広帯域DSSCを用いた多接合セルの作製
 - (6) 全固体型広帯域DSSCの作成
- といった基礎から応用にかけて幅広い観点で研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) スピン反転励起の発現メカニズム

スピン反転励起はホスフィン配位子の存在と、ターピリジル配位子の共役系の大きさに影響を受けることが予想されたため、本研究では配位子サイズがスピン交換エネルギーに対して定量的にどのような影響を与えているかを調べた。具体的方法としてはDFT計算を用いた交換積分の評価、及び低温吸収スペクトルと発光測定からスピン交換エネルギーを見積もった。また単結晶X線構造解析からRu錯体色素の構造を明らかにし、交換エネルギーの計算と比較した。

(2) スピン反転励起の遷移エネルギーについて理論的解析

主にDFTによる分子軌道計算を行った。分子軌道計算は密度汎関数法(DFT)で行った。構造最適化はGaussian社のGaussian09プログラムで行い、汎関数にはメタハイブリッド密度勾配近似(meta-hybrid GGA)を利用するM06を用い、基底関数には6-31G(d)とRu原子にのみLanL2DZの内殻コアポテンシャル近似(ECP)を取り入れ、溶媒和効果を考慮して行った。その構造を基に時間依存密度汎関数法(TD-DFT)による励起エネルギーの計算をSCM社のADFプログラムで行い、スピン軌道相互作用(SOC)の相対論的效果をzeroth-order regular approximation (ZORA)によって2成分近似したDirac方程式を基に解析した。

(3) スピン反転遷移の遷移確率向上に向けた分子設計

分子の設計には我々が行った先行研究を基に、配位子を拡張したターピリジル配位子の合成を行った。遷移確率の見積もりは(2)と同様にDFTによる分子軌道計算を行った。またこうして合成した増感色素を用いた太陽電池デバイスの性能評価を行い、遷移確率向上がどのようにエネルギー変換効率に影響を与えるかを調査した。

(4) TiO₂への電子移動効率を向上させるためのTiCl₄による結晶成長と電荷分離効率の観測

酸化チタン電極は、平均粒子サイズ18nm~30nmの酸化チタンを分散させたペーストを、スクリーン印刷法を用いてFTOガラス電極上に塗布・製膜したのち、500℃で焼成して作製した。この後、得られた酸化チタン電極に対し、四塩化チタン溶液(TiCl₄aq)での処理を行い、性能の違いを分光感度スペクトルや時間分解分光測定により計測した。

(5) 広帯域DSSCを用いた多接合セルの作製

主に2種類の構造のセルを作製した。一つはメカニカルスタック構造によるもので、白金対極の代わりに透明導電性膜を用いて光透過性を兼ね備えたセルを用いる方法について検討した。もう一つの方法は、可視光に感度を持つ各種有機系太陽電池と広帯域色素増感太陽電池を用い、ダイクロイックミラーを用いて分光した分光型タンデムセルを構築し、デバイス特性評価を行った。

(6) 全固体型広帯域 DSSC の作成

全固体化するにあたり、ホール輸送材量を酸化チタンナノ多孔体に浸透させる必要があるため、短絡防止用の酸化チタン緻密層を製膜し、酸化チタンナノ多孔体の粒子サイズ、及び膜厚を制御したデバイスを作製した。具体的にはエッチングした透明導電性ガラス基板 (FTO) 表面にチタンイソプロポキシドのエタノール溶液をスプレー塗布し、ホットプレート上で加熱することにより TiO_2 緻密層を形成した。その上に TiO_2 ナノ粒子ペーストをスクリーンプリントで塗布し 500°C で焼結することによって TiO_2 多孔質層を形成した。その酸化チタン表面に色素を吸着させ、各種ホール輸送材をスピコートにより製膜することによってホール輸送層を形成した。

4. 研究成果

(1) スピン反転励起の発現メカニズム

本研究ではホスフィン配位子を置換した金属錯体を合成し、スピン禁制遷移の大きさについて調査した。スピン反転遷移を示す Ru 錯体色素 (DX1, 図 1) のメチルエステル体の低温時における吸収スペクトルを測定した。長波長側にりん光スペクトルと重なる S-T 遷移由来のピークが見られた。一方、DX1 のホスフィン配位子をピリジン配位子に置換した化合物 (DX1-py) では、長波長域の吸収帯の強度が減少した。メチルエステル体の単結晶 X 線構造解析を行ったところ、Ru-ターピリジル配位子間の結合距離は DX1-py に比べて DX1 の方が長くなった。特に変化が大きいのは、ターピリジン配位子の 3 つのピリジン環の中央のピリジン上窒素と Ru との結合であった。これは、ホスフィンやピリジン配位子がターピリジンの中央のピリジン部位に対してトランス位に位置するためそれらの配位子と Ru との結合距離に対する影響を受けやすく、トランス効果の一種と解釈できる。また、結合距離の変化によって、Ru-ターピリジル配位子間の金属配位子間電荷移動遷移 (MLCT) の交換積分が変化する事が明らかになった。結合距離が長くなる場合、MLCT の交換積分は相対的に小さくなり、一重項-三重項間のエネルギー差が小さくなる傾向にあった。よって、金属配位子間の結合距離がスピン軌道相互作用の大きさを制御する上で重要なパラメータの一つになっていることが示唆された。理論的な計算結果と照らし合わせると、DX1 の励起状態が MLCT 状態 (電子が主に Ru の d 軌道と配位子の *軌道にそれぞれ存在する電子配置) となっている。そのときに、スピン反転遷移は一重項と三重項状態それぞれ別々の d 軌道に電子が存在している状態間でスピン軌道相互作用が働くことが明らかになった。

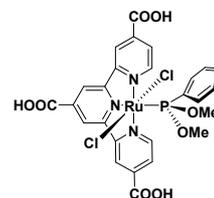


図 1. ホスフィン配位 Ru 錯体色素 (DX1)

(2) スピン反転励起の遷移エネルギーについて理論的解析

本研究では、色素の吸収帯域の拡張に向けた新たな Ru 錯体 DX2-3 (図 2) を合成した。ホスフィン配位子の配位子場が弱くなるにつれて最も長波長側に現れる スピン反転遷移由来のピークが長波長化し、同時に強度が僅かに弱くなった。 TD-DFT 計算により励起エネルギーの変化を見積もったところ、長波長側の吸収ピークは、三重項が関与する強いスピン軌道相互作用によって誘起された スピン反転遷移であり、三重項状態の T_1 と T_2 状態の電子配置が配置間相互作用によりそれぞれ混合し、結果としてブロードな吸収を示すことが明らかになった。一方、この色素の長波長領域の吸収帯を励起したところ、時間分解過渡吸収測定から三重項由来の長寿命成分の誘導吸収スペクトルが観測された。そこで得られた誘導吸収は、サブピコ秒オーダーの立ち上がりを示し、他の Ru 増感色素と比べて変化が早かった。よって、長波長吸収端の励起により、励起三重項状態が素早く生成していることが明らかになった。

また、この中で最も長波長域に光吸収帯を示す増感色素 DX3 を用いた DSSC は、1100nm まで広がる幅広い分光感度特性を示し、AM1.5G の擬似太陽光下で $30\text{mAc}\cdot\text{m}^{-2}$ を超える J_{SC} を示した。この計測は神奈川科学技術アカデミーで実施され、外部機関で測定された DSSC の光電流値として最も高い光電流値が得られた。

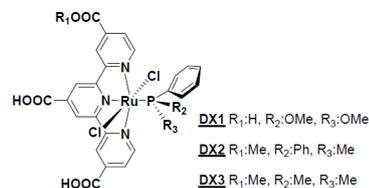


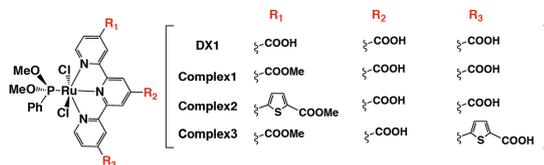
図 2. DX1-3 の構造。

(3) スピン反転遷移の遷移確率向上に向けた分子設計

スピン禁制遷移の振動子強度は摂動論から考えるとスピン許容遷移の振動子強度に比例して大きくなる。DX1 における可視域の主な光吸収は一重項 MLCT に由来しており、その振動子強度を増加させることで近赤外領域に現れるスピン禁制遷移の強度を向上できると考えられる。一重項 MLCT 遷移は配位子由来の吸収に比例するが、チオフェン基導入によりポリピリジル配位子の共役系を拡張し、MLCT 遷移の遷移強度が高くなり吸光係数が向上することが先行研究より明らかになっている。そこでチオフェン基導入によって、DX1 のターピリジン配位子の共役系を拡張した Complex1-3 (図 3) について検討した。

光吸収特性評価は溶媒への溶解性を考慮し、エステル体で行った。ジクロロメタン溶液中における吸収スペクトルを測定すると、チオフェン基を導入した Complex2, 3-ester のモル吸光係数が Complex1-ester と比較し、350 nm 付近で約 1.7 倍、790 nm 付近で約 1.1 倍向上し、共役系拡張による効果が見られた。厚さ 30 μm の TiO_2 電極を用いて同じ浸漬条件 (色素 100 μM DMF

溶液、14 時間浸漬)のもと DSSC を作製し、光電変換特性の評価を行った。Complex1, 2 を比較するとチオフェン基導入により共役系が拡張しモル吸光係数が大きくなった結果、外部量子効率 (IPCE) が全体的に Complex2 の方が高くなった。また IPCE の向上によって短絡電流密度 (J_{sc}) が上昇し、エネルギー変換効率が 10.2%まで向上した。またチオフェン基の位置の異なる Complex2, 3 を比較すると、Complex3 のエネルギー変換効率が著しく劣ることがわかった。IPCE は全体的に 50%以下で Complex2 よりも小さく、 J_{sc} が低下した。また開放電圧 (V_{oc}) にも低下が見られたので電子寿命を測定したところ Complex3 の方が短く、電子-正孔の再結合速度が上昇することにより V_{oc} が減少していることが明らかになった。また TiO_2 と色素の界面の状態について考察するため、それぞれの TiO_2 への色素吸着量を調べると、Complex3 は Complex2 の約 1.2 倍吸着していた。Complex3 はカルボキシル基との間にチオフェン基を導入したことによって TiO_2 表面に吸着しやすくなり、吸着量が増加したため分子同士が接近し会合が起こりやすくなったことが電子寿命低下の原因であると考えられる。



(4) $TiCl_4$ による結晶成長と電荷分離効率 四塩化チタンを用いた酸化チタンの表面改質

は多くの色素において性能の改善に寄与する。DX1 を用いた広帯域増感色素においても例外ではなく、四塩化チタン処理により外部量子効率 (IPCE) の向上が見られた。特に、四塩化チタン処理を繰り返すにつれて性能の向上が見られた。このことについて色素の吸着量を調査したところ、四塩化チタン処理の回数と共に色素の吸着量が減少することが明らかになった。電子顕微鏡観察を行ったところ、酸化チタンの粒子サイズの増加が見られ、結果として比表面積が低下しているものと考えられる。また、酸化チタンナノ粒子間のネッキングが改善していた。一方、時間分解分光測定によると、四塩化チタン表面処理を行うことによって比表面積が減少し、色素間の会合が抑えられ、再結合速度が低下していることが明らかになった。

図 3. DX1 及び配位子の共役系を拡張させた Ru 増感色素 Complex1-3 の構造。

(5) 広帯域 DSSC を用いた多接合セルの作製

広帯域増感色素を用いた太陽電池で光電変換を行うと、大きな光電流を得ることができるが、一方で短波長域において熱的なエネルギーロスが起こるため変換効率には限界が生じてしまう。このロスを低減するには分光感度と開放電圧が異なる太陽電池を積層したタンデム型構造が有効である。そこで本研究では、広帯域 Ru 増感色素 DX1 を用いたタンデム型 DSSC を作製し、光電変換効率の向上を目指した。メカニカルスタックのタンデム DSSC は直列接続で実施した。直列タンデムセルの場合、タンデムセルを構成している各セルに流れる光電流量は等しく揃える必要がある。そこで本研究ではトップセル TiO_2 電極の膜厚制御を行うことで光吸収量の制御を試みた。各膜厚のトップセルの光電流量を擬似太陽光下 ($AM\ 1.5G$, $100\ mW/cm^2$) で測定したところ、有機色素である D205 を用いたセルの光電流量は Ru 金属錯体色素である N719 を用いたセルに比べ大きく変化した。N719 の可視域における光吸収は Ru からピピリジル配位子への電荷移動遷移であるのに対し、D205 は π - π^* 遷移であるため、モル吸光係数は N719 の方が小さな値を示す。よって、N719 を用いたセルでは膜厚に対する光電流量の変化が小さくなったと考えられる。タンデムセルの光電変換特性評価を行ったところ、N719 を用いたタンデムセルは、D205 を用いた場合に比べ膜厚制御による光電流の調節を容易に行うことができた。結果として、N719 トップセルを用いたタンデムセルは最高で 11.4% の変換効率を示し、単一セルでの変換効率 (~10%) に比べ高い値を示した。また、作製したタンデムセルは光量を通常約 4 分の 1 まで減らしても 11% を超える高い変換効率を示した。一般的な無機系太陽電池は光量を減らすと変換効率が急激に低下してしまうのに対し、タンデム型 DSSC は曇天、雨天などの光量が少ない場面でも安定的な変換効率で電力を供給することができると期待できる。

本研究ではメカニカルスタック構造の他に、吸収帯域をさらに拡張した広帯域色素 (DX3) を用いた DSSC と、近年注目を集める高い開放電圧を示す有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池 (PSC) を組み合わせたハイブリッド多接合型セルの検討を行った。ペロブスカイトセルは TiO_2 緻密膜で被覆された FTO ガラス基板上有機金属ハライドペロブスカイト (基本組成: $CH_3NH_3PbI_3$) 層を製膜し、さらにホール輸送層 (Spiro-OMeTAD) と金電極を積層し作成した。多接合型太陽電池は、長波長用 DSSC と短波長用ペロブスカイトセルを用い、波長分割用ダイクロイックミラーを組み合わせて作成した。ペロブスカイトセルは、ペロブスカイト層中のメソポーラス TiO_2 層の有無が異なる 2 種類のセルを作成した。光照射に対する安定性はメソポーラス層のあるセルの方が高かった。DX3 を用いた広帯域 DSSC とペロブスカイトセルを組み合わせた多接合型太陽電池のデバイスでは、用いるダイクロイックミラーの分割波長によって効率が変化した。本研究では最も高い性能を示した 18.4% のエネルギー変換効率のペロブスカイト太陽電池を用いた。擬似太陽光を 660nm 付近で分割して近赤外領域の光を DSSC、可視領域の光をペロブスカイトセルへ照射すると DSSC とペロブスカイトセルの両者の光電流が一致することが明らかとなり、20% 以上のエネルギー変換効率を示す直列タンデム型太陽電池を構築できることが示唆された。また、770nm 付近に分割波長を持つミラーを用いると、デバイス全体のエネルギー変換効率は 21.5% となり、有機系多接合型太陽電池として最も高い効率が得られた。

(6) 全固体型広帯域 DSSC の作成

全固体 DSSC の開発は電解液の代わりに、有機や無機のホール輸送材 (HTM) の利用が検討されてきた。そこで開発されてきたホール輸送材は大きく有機系および無機系の 2 つに分類され、有機ホール輸送材は高い有機溶媒への溶解性を示すため溶液プロセスに適しているが、一方で移動度が無機材料に比べ低い傾向にある。また無機のホール輸送材は一般的に高い移動度を示すが、有機溶媒への溶解性に乏しく、酸化チタンナノ多孔体を用いる DSSC への製膜に適用できる材量が少ない。本研究では、多くの実績のある有機のホール輸送材である spiro-OMeTAD を用いた全固体型太陽電池を作製した。DX1 を増感色素に用いた全固体型太陽電池はとても高い開放電圧 (0.664V) を示した。これは電解液を用いた湿式セルよりも高い値であった。一方短絡電流は 1.86 mA cm^{-2} と電解液を用いた場合に比べて大幅に低い値となった。これは酸化チタンナノ多孔層の厚みが湿式セルに比べて 10 分の 1 以下であるため、光吸収が十分に行われて異なる事が示唆される。また、酸化チタン層の厚さを増やした場合、spiro-OMeTAD の充填が十分に行われず性能が低下するため、今後は光捕集能力の改善が課題として残った。しかしながら、エネルギー変換効率は 0.87% と、他の有機高分子などを用いた場合の全固体セル (~0.3%) と比べて高い性能を示した。今後デバイスと色素構造の改善によりさらに高い性能が期待される。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) “ Solid-state Dye-sensitized Solar Cells Using $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{SnI}_6$ Perovskite with Wideband Sensitizer ”
Takumi Kinoshita, Rentaro Kakeno, and Hiroshi Segawa,
Chemistry Letters, 47, (2019) in press. (査読有)
- (2) “ Pyrrolopyrrole aza boron dipyrromethene based two-photon fluorescent probes for subcellular imaging ”
Yimin Zhou, Chao Ma, Nengyue Gao, Qiong Wang, Pui-Chi Lo, Kam Sing Wong, Qing-Hua Xu,
Takumi Kinoshita and Dennis K. P. Ng
Journal of Materials Chemistry B, 6, (2018) 5570-5581. (査読有)
- (3) “ Highly Efficient 17.6% Tin-Lead Mixed Perovskite Solar Cells Realized through Spike Structure ”
Gaurav Kapil, Teresa S. Ripolles, Kengo Hamada, Yuhei Ogomi, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Jakapan Chantana, Kenji Yoshino, Qing Shen, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, Takurou N. Murakami, Hiroshi Segawa, and Shuzi Hayase,
Nano Letters 18 (2018) 3600-3607. (査読有)
- (4) “ Modulations of Various Alkali Metal Cations on Organometal Halide Perovskites and Their Influence on Photovoltaic Performance ”
Zeguo Tang, Satoshi Uchida, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Haibin Wang, Fumiyasu Awai, Ryota Jono, Masato M. Maitani, Jotaro Nakazaki, Takaya Kubo, Hiroshi Segawa,
Nano Energy 45, (2018) pp.184. (査読有)
- (5) “ Near-infrared Photoelectric Conversion by Singlet-Triplet Transition of the Iminopyridine Ru(II) Complex ”
Takumi Kinoshita, Hiroshi Segawa
Chemistry Letters 47, (2018) 1311-1313. (査読有)
- (6) “ Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite ”
Zeguo Tang, Takeru Bessho, Fumiyasu Awai, Takumi Kinoshita, Masato Maitani, Ryota Jono, Takurou murakami, Haibin Wang, Takaya Kubo, Satoshi Uchida, Hiroshi Segawa,
Scientific Reports 7, (2017) pp.12183. (査読有)
- (7) “ Push-Pull Distyryl Boron Dipyrromethenes as Near-Infrared Sensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells ”
Wen-Jing Shi, Takumi Kinoshita, and Dennis K. P. Ng,
Asian J. Org. Chem., 6, (2017) pp. 1476-1485. (査読有)
- (8) Inside Cover: Ethynyl Linked Donor Acceptor Boron Dipyrromethenes for Panchromatic Dye Sensitized Solar Cells (Asian J. Org. Chem. 6/2017)
Wen-Jing Shi, Takumi Kinoshita, and Dennis K. P. Ng,
ASIAN JOURNAL OF ORGANIC CHEMISTRY 6(6) (2017) 635-635.
- (9) “ Ethynyl-Linked Donor-Acceptor Boron Dipyrromethenes for Panchromatic Dye-Sensitized Solar Cells ”
Wen-Jing Shi, Takumi Kinoshita, and Dennis K. P. Ng,
Asian J. Org. Chem. 6(6) (2017) pp.758-767. (査読有)
- (10) “ Spectral splitting photovoltaics using perovskite and wideband dye-sensitized solar cells ”
Takumi Kinoshita, Kazuteru Nonomura, Nam Joong Jeon, Fabrizio Giordano, Antonio Abate,

- Satoshi Uchida, Takaya Kubo, Sang Il Seok, Mohammad K. Nazeeruddin, Anders Hagfeldt Michael Grätzel, and Hiroshi Segawa, Nature Communications, 6 (2015) pp. 8834 (8 pages). (査読有)
- (11) “Theoretical Investigation of $[\text{Ru}(\text{tpy})_2]^{2+}$, $[\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})(\text{H}_2\text{O})]^{2+}$, and $[\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})(\text{Cl})]^+$ Complexes in Acetone Revisited: Inclusion of Strong Spin-Orbit Couplings to Quantum Chemistry Calculations” Kenji Mishima, Takumi Kinoshita, Michitoshi Hayashi, Ryota Jono, Hiroshi Segawa, Koichi Yamashita, Journal of Theoretical and Computational Chemistry, 15 (2016) pp. 1650001 (20 pages). (査読有)
- (12) “Theoretical Studies on the Absorption Spectra of $\text{cis-}[\text{Ru}(4,4'\text{-COO-2,2'}\text{-bpy})_2(\text{X})_2]^{4-}$, (X = NCS, Cl) and Panchromatic trans-Terpyridyl Ru Complexes Including Strong Spin-Orbit Coupling” Kenji Mishima, Takumi Kinoshita, Michitoshi Hayashi, Ryota Jono, Hiroshi Segawa, Koichi Yamashita, Sheng Hsien Lin, Physical Chemistry Chemical Physics, 17 (2015) pp.12317-12327. (査読有)
- (13) “ペロブスカイト太陽電池の現状と展望” 中崎城太郎、木下卓巳、内田 聡、瀬川浩司, オプトニュース 10(4) (2015) pp.24-29.
- (14) “スピン反転遷移を用いた広帯域色素増感太陽電池の高性能化” 木下卓巳, 日本写真学会誌, 77(4) (2014) pp.627-630. (招待)
- (15) “広帯域増感色素と有機金属ハライドペロブスカイトを用いた高効率有機系タンデム太陽電池” 木下卓巳、瀬川浩司, 表面科学, 35(11) (2014) pp.171-175. (査読有)
- [学会発表](計20件) 招待講演のみ
- (1) Takumi Kinoshita, "Solution processed multijunction perovskite solar cells with wideband photosensitizers" 2018 Taiwan-Japan Bilateral Symposium on Green Energy 2018. (招待講演)
- (2) 木下卓巳「金属ハライドペロブスカイトを用いた有機系多接合太陽電池の開発」光機能材料研究会 第70回講演会「多接合・マルチバンド太陽電池」2018. (招待講演)
- (3) 木下卓巳「広帯域色素増感太陽電池の開発と高効率化への応用展開」日本化学会第95春季年会 2015 (招待講演)
- (4) Takumi Kinoshita “Wideband ruthenium sensitizers for multi-junction photovoltaics using lead halide perovskite solar cells” 11th International workshop on supermolecular nanoscience of chemically programmed pigments 2015 (招待講演)
- (5) 木下卓巳「スピン反転励起を用いた色素増感太陽電池の広帯域化技術」第11回日本写真学会光機能性材料セミナー 2014 (招待講演)
- [図書](計2件)
- (1) “近赤外・紫外線-波長変換と光吸収増大による太陽電池の高効率化技術”「第2章 近赤外線-可視光変換による太陽電池の発電効率向上」 木下卓巳、瀬川浩司、S&T出版 (2016)
- (2) “ペロブスカイト薄膜太陽電池の開発と最新技術”「第3編ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けたセル作成技術 第7章ペロブスカイト型太陽電池を用いたタンデムセルの作製」 木下卓巳, 技術教育出版 (2014)
- [産業財産権]
- 取得状況(計1件)
- 名称: 光電変換素子用色素、それを用いた光電変換膜、電極及び太陽電池
 発明者: 瀬川 浩司, 木下 卓巳, 藤沢 潤一, 中崎 城太郎, 内田 聡, 久保 貴哉
 権利者: 東京大学
 種類: 発明特許
 番号: 特許第 6101625 号
 取得年: 平成 29 年 3 月 3 日登録
 国内外の別: 国内及び国際(WO2012-121236)

6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし
 (2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。