

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26620065

研究課題名(和文)ペロブスカイト太陽電池における界面のキャリア拡散と電子状態解析

研究課題名(英文)Carrier diffusions and their electronic states at interfaces in perovskite solar cells

研究代表者

小堀 康博(Kobori, Yasuhiro)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・教授

研究者番号：00282038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、新たな次世代太陽電池の有力候補として急速に注目を集めているペロブスカイト結晶を用いる無機有機ハイブリッド太陽電池の光電荷分離状態を時間分解電子スピン共鳴法で観測した。1)光活性層・正孔輸送層において電子や正孔を伝達し輸送する不對電子軌道を特定し、2) ペロブスカイト/酸化チタン多孔質などの層界面におけるキャリア拡散ダイナミクスと格子運動および、3)層界面において生じる電子-正孔対による電子軌道重なる空間的広がりを正確に特徴付けた。以上の計測から、接合界面が高効率な光電変換を引き起こす根源的な機構の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years, great attentions have been attracted on the perovskite solar cells as the next generation thin-film photovoltaics that can be low-cost, flexible and light. In this study, we observed photoinduced separated charges in the photoactive layers in the perovskite (CH₃NH₃PbI₃) solar cells by using the time-resolved electron paramagnetic resonance spectroscopy for the three layer thin films (Spiro-OMeTAD/CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ on a glass substrate) composed of the organic hole transport layer (Spiro-OMeTAD), the CH₃NH₃PbI₃ layer and the mesoporous TiO₂ fabricated by spin coating method on the mesoporous TiO₂ films. We have characterized the spin density distributions of the trapped holes of the CH₃NH₃PbI₃ layer at 110 K. Furthermore, from the ESP generated in the trapped hole, we have estimated the J coupling in the primary electron-hole pairs which will give us an insight on the electronic coupling of the Wannier excitons.

研究分野：物理化学・スピン化学

キーワード：太陽電池 電子スピン共鳴 無機・有機ハイブリッド ペロブスカイト 電荷分離 ワニエ励起子

1. 研究開始当初の背景

最近、光吸収層としてペロブスカイトを用いた高効率無機・有機ハイブリッドプリンタブル太陽電池が発表され、新たな次世代太陽電池の有力候補として急速に注目を集めている(Miyasaka et al. Science2012)。2013年には、早くも15%を越える高い光電変換効率が相次いで報告され(Gratzel et al. Nature2013)、世界中で研究開発競争が激化している。この太陽電池はペロブスカイト($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)層が光吸収剤となり、酸化チタン多孔質層(Porous TiO_2)に電子を与える。電池特性では770 nm付近の低エネルギー光でも高い光電流を与えることが際立つ特徴である一方、高い開放端電圧を与えることも知られており、光エネルギー損失が極めて小さいことも重要な特徴である。このようにエネルギー損失が大きく抑制され、かつ高い光電流を与える発電の根源的な仕組みは大きな謎に包まれており、今後の高効率太陽電池設計にとって極めて重要な研究課題である。申請者の小堀は、ごく最近に太陽電池材料の実験的解析においてインパクトの高い成果を挙げている。時間分解電子スピン共鳴分光法により有機薄膜太陽電池の光活性層界面に生成する電子-正孔対の立体構造と分子運動を初めて明らかにし、電荷再結合過程を抑制し、効率よく光電流を生成させる仕組みを示した。(Kobori et al. JPCC 2013)

2. 研究の目的

近年、新たな次世代太陽電池の有力候補として急速に注目を集めているペロブスカイト結晶を用いる無機有機ハイブリッド太陽電池の光電荷分離状態を高速時間分解電子スピン共鳴法で観測する。1)光活性層・正孔輸送層において電子や正孔を伝達し輸送する不對電子軌道を特定し、2)ペロブスカイト/酸化チタン多孔質などの層界面におけるキャリア拡散ダイナミクスと格子運動および、3)層界面において生じる電子-正孔対による電子軌道重なる空間的広がりを正確に特徴付ける。以上の計測から、接合界面が高効率な光電変換を引き起こす根源的な機構の解明に挑戦する。本研究では、時間分解電子スピン共鳴(TREPR)法を用い、無機・有機ハイブリッド太陽電池の初期光電変換過程において重要な役割を果たすペロブスカイト/酸化チタン多孔質層界面の光電荷分離過程を観測する。低温領域の束縛電荷分離状態の測定と共に、高温領域ではペロブスカイト層および正孔輸送層において高速なキャリア拡散・解離により生成する電子スピン分極とスピン緩和時間を定量化する。電子や正孔を伝達し輸送する不對電子軌道を特定し、電子-正孔対におけるキャリア拡散定数と、不對電子軌道の重なりや空間的広がりを正確に特徴付ける。

3. 研究の方法

早瀬修二教授ら(九工大)と連携し、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Porous TiO}_2$ /正孔輸送層など、

様々な太陽電池基板を作成すると共に、現有する時間分解電子スピン共鳴システムに誘電体マイクロ波共振器を導入し、高速時間分解測定システムを立ち上げる。作成した基板について、まず1)極低温条件下での時間分解EPR測定により、束縛状態にある界面光電荷分離状態の立体構造と電子的相互作用を決定し、どの空間的位置にどのような電子状態のトラップ準位が存在するかを特定する。2)高温領域では、界面電荷分離後の電子-正孔対におけるキャリア拡散によって生成する電子スピン分極を定量化する。キャリア拡散定数と、不對電子軌道重なる空間的広がりの特徴付ける。1)と2)の結果により、光電流に寄与する界面電荷分離キャリアの「トラップ深さ」を特定する。

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Porous TiO}_2$ 基板について、神戸大にて真空処理を施し時間分解電子スピン共鳴測定を行う。当研究室大学院生(M1)の宮崎を雇用し、先端研究活動に専念させる。宮崎は主に低温領域での測定を行い、界面電荷分離状態の構造決定を行う。界面電荷分離状態を形成する各ラジカルは不對電子軌道が受けるスピン軌道相互作用によりg因子に異方性を持つ。電荷分離状態では電子スピン間の相互作用として、双極子間相互作用が存在する。これら二種の異方性の組み合わせが時間分解EPRスペクトルの線形に現れるため、界面トラップ状態として存在する電荷分離状態の立体構造(ラジカル配向およびラジカル間距離)を決定する事ができる(Kobori et al. JPCC 2013)。さらに、交換相互作用の値から、界面電荷分離状態の電子的相互作用を定量化する(Kobori et al. PNAS 2005)。

上記の基板において、高温領域での測定を進める。高温では、低温で観測されたトラップ状態はクーロン場や格子ひずみから開放され、伝導キャリアになる事が予想される。高温条件下で初期に生成したキャリア間距離の小さい電荷分離状態においては、ラジカル対における磁氣的相互作用が働くことにより、ラジカル対の一重項-三重項変換が起こる。キャリア解離ダイナミクスとこの磁気変換過程とが競争的に起こることによって、解離キャリアに電子スピン分極が生成する(ラジカル対機構)。このラジカル対機構による電子スピン分極を定量化することにより、電荷解離初期におけるキャリア拡散係数と交換相互作用の空間的広がりを定量化する(Kobori et al. JPCB **108** 10226 (2004))。さらに、この電子スピン分極の減衰時間から、キャリアにおけるスピン格子緩和時間が決定され、図3界面の格子運動によるスピン揺らぎ運動の相関時間が得られる。様々な温度条件下において測定・解析を行うことにより、格子の運動性がキャリアの拡散過程や電子的相互作用の距離に対する広がりやどのような影響を与えるのかを具体的に明らかにする。

4. 研究成果

まず洗浄したガラス基板に酸化チタンナノ

粒子をガラス基板に 773 K で 30 分間焼結し、酸化チタン多孔質膜を形成させた。これに PbI_2 溶液 (溶媒 DMF) を 343 K、窒素雰囲気下で 30 分間スピンコートした後、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液 (10 mg/ml、溶媒 2-プロパノール) に 30 分間浸した。この段階で酸化チタン多孔質膜上にペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 膜が形成される。この薄膜の上から Spiro-OMeTAD 溶液 (溶媒クロロベンゼン) を窒素雰囲気下でスピンコート処理することで $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Spiro-OMeTAD}$ ガラス基板を作成した。この基板を窒素雰囲気下のグローブボックス内で裁断後サンプルチューブに封入し、真空脱気後に窒素で再び満たした。このサンプルに Nd:YAG laser 第二高調波 (波長: 532 nm、パルス幅: 5ns) を照射し、110 K で TR-EPR 測定を行った。

レーザー照射後の各遅延時間の TREPR スペクトルを計測した。レーザー照射 0.25 μs 後には数多くのピークが生じ始め、0.5 μs 後付近でこれら信号の強度は最大になり、その後各ピークの強度は減少していく様子がみられた。低磁場側の幅の広い信号の中心位置の g 値は 2.08 付近にあり自由電子の g 値 (2.0023) から大きくはずれている。一般にスピン軌道相互作用の寄与が大きい原子をもつラジカルでは g 値が 2.0023 から大きく外れる。今回の場合では $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の Pb^{2+} の正孔受容によって生じる Pb^{3+} の 6s 軌道上の対電子が、スピン軌道相互作用の寄与が大きい I 上に流れ込むことによって大きな g 値を生じたと結論した。この信号は約 40 mT の範囲にわたってピークが複数みられ、これは Pb^{3+} を取り囲む ^{127}I (核スピン $I = 5/2$) からの超微細相互作用によるものと結論された。一つの $I = 5/2$ 核からは 6 本の等強度の分裂が現れることから、得られた低磁場側のピークはこの分裂パターンを反映したものである。一方、高磁場側にはブロードな信号とシャープなピークが得られた。 $g = 1.93$ 付近は、アナターゼ型酸化チタンの表面サイトにトラップされた電子の信号に一致した。また酸化チタン結晶格子内の Ti^{4+} にトラップされた電子 ($g_x = g_y = 1.992$, $g_z = 1.962$) の信号も重なっていると考えられる。以上の結果より、レーザー照射によって励起されたペロブスカイト層で生じた電子-正孔対の電子が酸化チタン多孔質層に移動した後にトラップされ、 $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 界面の電荷分離状態が生成したと結論した。そこで励起一重項状態を前駆体としたスピン相関ラジカル対モデルにおいて、確率 Liouville 方程式に基づき段階的電荷分離反応を考慮した解析を行った。その結果、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ における初期電荷分離状態を経由して、正孔は $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ のヨウ素に、電子は酸化チタンの表面サイトにトラップされた、二段階目の電荷分離状態を考慮することでシミュレーションすることができた。上記のシミュレーションの初期電荷分離状態である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の励起状態において、

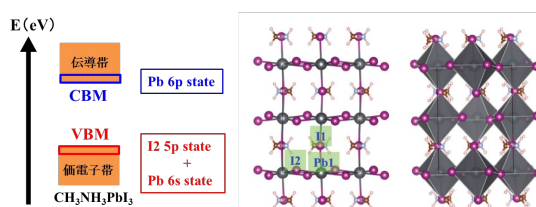


図 1. H. Zhao らの行った状態密度計算の概念図 (左) と斜方晶での $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の結晶構造 (右)

電子は Pb^{2+} の 6p 軌道に分布し、正孔は主に I の 5p 軌道に分布しているとされている。D. J. Nelson, M. C. R. Symons および R. I. Mashkovtsev らの報告した g 因子の値を用いペロブスカイト結晶層内に生じる初期電荷状態の一重項-三重項ダイナミクスを考慮すると、電子スピン量子コヒーレンスを見積もることが可能である。この電子スピン量子コヒーレンスが $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 界面での二段階目の電荷分離状態に引き継がれることで、低磁場側にマイクロ波の放出 (E)、高磁場側に吸収 (A) の E/A スペクトル線形が得られたと解釈できる。よって時間分解 EPR 法で有意なラジカル対機構によるスピン分極を観測するためには、スピン分極 P が磁化の絶対値として 10^{-2} から 10^{-1} 程度のオーダーになるような、電子スピン量子コヒーレンスが生成される必要がある。また初期電荷分離状態から二段階目の電荷分離状態へ移行するときの速度定数 $k_{\text{CS}2}$ も電子スピン量子コヒーレンスの生成に関わる。例えば $k_{\text{CS}2}$ が十分に大きい場合には、上記の量子コヒーレンスが進展する前に二段階目の電荷分離状態へと移行してしまうので、有意な EPR 強度は生まれない。このことから、 g 因子の異方性を反映して磁氣的相互作用の値は角周波数単位で $5.82 \times 10^9 \sim 1.44 \times 10^{10} \text{ rad s}^{-1}$ 程度であり、磁場単位に換算すると数百ガウス程度となるため、0.01 から 0.1 程度のオーダーの磁化を生じるためには、初期電荷分離状態における交換相互作用 J_1 のオーダーは 10 から 10^2 ガウスで与えられる。一方 $k_{\text{CS}2}$ に関しては、 J_1 のオーダーが角周波数単位で 10^9 rad s^{-1} から $10^{10} \text{ rad s}^{-1}$ であるから、周波数単位として、 $k_{\text{CS}2}$ のオーダーは 10^9 s^{-1} 程度になることが見積もられた。以上の交換相互作用および、速度パラメータを用いたシミュレーションによって、実験で得られた TREPR スペクトル線形を合理的に再現することができた。一方、報告されている電子および正孔の移動度 $\mu (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$ と $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の膜厚を用いて、初期電荷分離状態で生成された励起子の寿命を見積もる。X. Y. Chin らの行った DFT 計算によれば、斜方晶の結晶構造の $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ における電子および正孔の移動度はそれぞれ約 $50 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ と約 $15 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ である。したがって、測定温度の 110K における電子および正孔の拡散係数 D_e , D_h は、アインシュタインの式を用いて

それぞれ、 $D_e=0.474 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 、 $D_h=0.142 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ と求められる。ここで低温において生成する励起子（電子-正孔対）の拡散係数 D_{ex} は、移動度の小さい正孔によって決まるとして励起子拡散の速度を考えた。なお室温では $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ において自由電荷として振る舞う電子と正孔が、低温条件において 25 meV から 37 meV のクーロン結合もつワニエ励起子として振る舞うことが実験的にも報告されているため、電子と正孔がワニエ励起子として対のまま拡散することは十分に考えられる。以上の拡散係数 D_{ex} と膜厚 d を用いて、励起子がペロブスカイト層を拡散するのに要する時間は、 d^2/D_{ex} で表され、3 ns という値が得られた。得られた拡散時間のオーダー（ナノ秒スケール）は、シミュレーションで求められた励起子の寿命のオーダーと一致する。R. Fleming らは $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の結晶構造が斜方晶となる温度条件で、ピコ秒領域の過渡吸収測定を行いフレンケル励起子の存在を示唆したが、彼らは測定結果をフィッティングするのに用いた二成分のうち、ピコ秒オーダーの寿命のものをフレンケル励起子に、ナノ秒オーダーの寿命のものをワニエ励起子に帰属している。このワニエ励起子がナノ秒オーダーの寿命をもつことから、本実験系の初期電荷分離状態において電子スピン量子コヒーレンスを生成した励起子はワニエ励起子に帰属される。以上のことから Spiro-OMeTAD/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ 基板では、斜方晶の結晶構造をもつ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ において、光照射により生成されたワニエ励起子の一重項-三重項変換によって生じた電子スピン量子コヒーレンスが、酸化チタンの表面サイトにトラップされた電子、また Spiro-OMeTAD/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 界面近傍のヨウ素欠陥にトラップされた正孔のスピンの分極として引き継がれたことで、E/A 信号が得られたと結論した。

本研究は、ペロブスカイト型太陽電池において光電変換機能に主要な役割を果たす光活性層について、光励起初期過程で生成する高速な励起子拡散ダイナミクスにより生じるスピンドイナミクスを初めて明らかにした。さらに空間的に大きく広がったワニエ励起子における交換相互作用 ($J=10\sim 100 \text{ G}$) の値も初めて見積もることができた。本成果は今後のデバイス構造の設計や電子、正孔輸送材料の開発にとって極めて重要な知見を与えるものである。

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 14 件)

- I. Karimata, Y. Kobori, and *T. Tachikawa “Direct Observation of Charge Collection at Nanometer-Scale Iodide-Rich Perovskites during Halide Exchange Reaction on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ” *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 1724–1728 (2017).
- M. Hasegawa, H. Nagashima, R. Minobe, T. Tachikawa, *H. Mino and *Y. Kobori “Regulated Electron Tunneling of Photoinduced Primary Charge-Separated State in the Photosystem II Reaction Center” *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 1179–1184 (2017).
- E. Saito, T. Ako, *Y. Kobori and *A. Tsuda, “Switching of the π -electronic conjugations in the reduction of a dithienylethene-fused p-benzoquinone” *RSC Adv.* 7, 2403–2406 (2017).
- M. Nakamura, K. Kishimoto, *Y. Kobori, T. Abe, K. Yoza, *K. Kobayashi, “Self-Assembled Molecular Gear: A 4:1 Complex of Rh(III)Cl Tetraarylporphyrin and Tetra(p-pyridyl)cavitand” *J. Am. Chem. Soc.* 138, 12564–12577 (2016).
- T. Miura, T. Tachikawa, *Y. Kobori “Morphology Effect on Geometry of Photoinduced Charge-Separated State in P3HT:PCBM Blend Films as Studied by Time-Resolved EPR Spectroscopy” *J. Photopolym. Sci. Technol.* 29, 561–564 (2016).
- *R. Matsubara, T. Shimada, *Y. Kobori, T. Yabuta, T. Osakai, M. Hayashi, “Photoinduced Charge-Transfer State of 4-Carbazolyl-3-(trifluoro-methyl)benzoic Acid: Photophysical Property and Application to Reduction of Carbon-Halogen Bonds as a Sensitizer” *Chem-Asian J.* 11, 2006–2010 (2016).
- M. Fuki, H. Murai, T. Tachikawa, Y. Kobori* : Time Resolved EPR Study on the Photoinduced Long-Range Charge-Separated State in Protein: Electron Tunneling Mediated by Arginine Residue in Human Serum Albumin *J. Phys. Chem. B* 120, 4365–4372 (2016).
- T. Miura, R. Tao, S. Shibata, T. Umeyama, T. Tachikawa, H. Imahori, Y. Kobori* : Geometries, Electronic Couplings, and Hole Dissociation Dynamics of Photoinduced Electron-Hole Pairs in Polyhexylthiophene-Fullerene Dyads Rigidly Linked by Oligophenylenes *J. Am. Chem. Soc.* 138, 5879–5885 (2016).
- T. Tachikawa*, T. Ochi, Y. Kobori: Crystal-Face-Dependent Charge Dynamics on a BiVO_4 Photocatalyst Revealed by Single-Particle Spectroelectrochemistry *ACS Catal.* 6, 2250–2256 (2016).
- T. Higashino, T. Yamada, M. Yamamoto, A. Furube, N. V. Tkachenko*, T. Miura, Y. Kobori*, R. Jono, K. Yamashita*, H. Imahori*: Remarkable Dependence of Final Charge Separation Efficiency on Donor-Acceptor Interaction in Photoinduced Electron Transfer *Angew. Chem.-Int. Edit.* 55, 629–633 (2016).

11. T. Tachikawa*, I. Karimata, Y. Kobori: Surface Charge Trapping in Organolead Halide Perovskites Explored by Single-Particle Photoluminescence Imaging *J. Phys. Chem. Lett.* 6, 3195–3201 (2015).
12. Y. Kobori*, N. Ponomarenko, J. R. Norris*: Time-Resolved Electron Paramagnetic Resonance Study on Cofactor Geometries and Electronic Couplings after Primary Charge Separations in the Photosynthetic Reaction Center, *J. Phys. Chem. C* 119, 8078–8088 (2015).
13. Y. Kobori*, T. Miura: Overcoming Coulombic Traps: Geometry and Electronic Characterizations of Light-Induced Separated Spins at the Bulk Heterojunction Interface *J. Phys. Chem. Lett.* 6, 113–123 (2015). 【Perspective】
14. Y. Kobori*, T. Miura: Time-Resolved Electron Paramagnetic Resonance Study on Long-Range Interfacial Electronic Coupling in Organic Photovoltaic Interface *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 35, 621-626 (2014).
〔学会発表〕(計 8 件)
1. Yasuhiro Kobori, Time-resolved EPR study on cofactor geometries and electronic couplings after primary charge-separations in the photosynthetic reaction center, SCM 2015 - 14th International Symposium on Spin and Magnetic Field Effects in Chemistry and Related Phenomena, "Kolkata, India", 2015,03,国際,口頭発表(招待・特別)
2. Yasuhiro Kobori; Nina Ponomarenko; James R. Norris Jr., Time-Resolved EPR study on cofactor geometries and electronic couplings of primary charge-separated state in the photosynthetic reaction center, 2nd Awaji International Workshop on "Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications, 淡路国際会議場(兵庫県),2014,06,国際,口頭発表(招待・特別)
3. Yasuhiro Kobori, Electron-hole dissociations influenced by alkyl side chains in the photovoltaic Polyalkylthiophene:PCBM interface,32nd National Physics Congress of the Samahang Pisika ng Pilipinas,"National Institute of Physics University of the Philippines, Quezon City, Philippines",2014,10,国際,口頭発表(基調)
4. Yasuhiro Kobori, Electron-hole dissociations influenced by alkyl side chains in the photovoltaic Polyalkylthiophene:PCBM interface, Grand Renewable Energy International Conference, 東京ビックサイト(東京都),2014,08,国際,口頭発表(招待・特別)
5. Yasuhiro Kobori, Primary Charge-Separation Mechanism in the Photosynthetic Reaction Center, International Workshop for Green Photonics,,奈良先端科学技術大学院大学(奈良県),2015,09,国際,口頭発表(招待・特別)

6. Yasuhiro Kobori; Nina Ponomarenko; James R. Norris Jr., Time-resolved EPR on primary charge separation and recombination in the photosynthetic reaction center: Impact of electronic couplings, AWEST2015, 淡路国際会議場(兵庫県),2015,06,国際,口頭発表(招待・特別)

7. 小堀康博, 有機薄膜太陽電池の光電流生成初期過程:界面電子-正孔対の立体構造と電子状態,異分野融合ワークショップ「有機太陽電池開発の現状と展望」, 奈良先端科学技術大学院大学(奈良県) 2015,11,国内,口頭発表(招待・特別)

8. 小堀康博; 長谷川将司; 立川貴士; 近藤徹; 長島宏樹; 酒井貴弘; 三野広幸, 時間分解 EPR 法によるホウレン草の光合成光化学系 II 反応中心における初期電荷分離構造,第 53 回日本生物物理学会年会,金沢大学角間キャンパス(石川県)2015,09,国内,口頭発表(一般)

〔図書〕(計 1 件)

1. 小堀康博 「電子スピンコヒーレンスによる有機太陽電池基板の電子伝達機能の解明」シーエムシー出版 「太陽光と光電変換機能-分野融合から生まれる次世代太陽電池-」2016 年 pp.148–155.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

プレスリリース

1. 「植物光合成による効率的な電荷生成の仕組みを解明-人工光合成系への応用に期待-」神戸大

http://www.kobe-u.ac.jp/NEWS/research/2017_03_01_01.html 2017 年 3 月 1 日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小堀 康博 (KOBORI YASUHIRO)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・教授

研究者番号: 00282038

(2)研究分担者 該当無し

(3)連携研究者

早瀬 修二 (HAYASE SHUJI)

九州工業大学・生命体工学研究科・教授
研究者番号: 80336099

尾込 裕平 (OGOMI YUHEI)

九州工業大学・生命体工学研究科・助教
研究者番号: 10718703

(4)研究協力者 該当無し