

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19105

研究課題名(和文)電子スピン分極イメージング法の開発による光電荷分離立体構造の三次元映像化

研究課題名(英文)3D visualization of geometries of photoinduced charge-separated states by development of electron spin polarization imaging method

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) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代のクリーンエネルギー創出に向け、反応初期過程の仕組みをオンゲストローム領域の三次元映像化によって明らかにする実験的方法論として時間分解電子スピン共鳴法による計測から分子集合体の初期過程で生成する電荷分離状態の中間体立体構造を、高い空間分解能にて三次元映像として可視化する「時間分解電子スピン分極イメージング法」を開発した。光合成タンパク質であるホウレン草のPSIIにおいて生成する初期電荷分離状態の不对電子軌道を特定し、中間体分子の距離および位置と分子配向を高い空間分解能にて画像化した。電子的相互作用を特徴付け、高効率な光エネルギー変換を引き起こす根源的な分子機構の解明を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、初期電荷分離活性種の同定を行うだけでなく、中間体分子の立体的な位置、距離、分子配向および軌道の広がりや重なりによる電子的相互作用を量子論に立脚した全く新しい磁気イメージング法の開発により正確に求めた。これは、試料の結晶化が不可能な複雑系であっても中間体やラジカル対の立体構造をオンゲストローム領域の高い空間分解能にて三次元映像化する画期的なツールを提供するものであり、磁気共鳴原理をベースとした本技術の開発は太陽電池における効率的電荷生成や新しい光触媒開発への応用や、特定分子をターゲットとする治療への応用など、産業・医療分野の広範囲な応用への可能性を十分に秘めている。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel method of “3D spin polarization imaging” by which the anisotropic spin polarization is mapped to all possible magnetic field directions from the powder-pattern time-resolved electron paramagnetic resonance (EPR) spectra to obtain geometries of the photoinduced primary charge-separated (CS) state of quinone pre-reduced membranes of plant PSII from spinach in frozen solution and in oriented multilayers at 77 K. For this we have observed the primary CS states using an X-band time-resolved EPR method. From the imaging maps, we have characterized cofactor geometries and electronic coupling of the photoinduced primary CS state. It has been revealed that the electronic coupling between the charges is significantly weak in the CS state separated by 1.5 nm, showing an importance of regulated cofactor-cofactor electronic interaction between a vinyl substituent and an accessory chlorophyll to inhibit the energy-wasting charge-recombination.

研究分野：物理化学

キーワード：光合成 光電荷分離 電子的相互作用 構造解析 太陽光エネルギー変換 電子スピン共鳴 タンパク質 異方性

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小堀は近年、Xバンド時間分解 EPR 法を用いて光合成系を含む様々なタンパク質複合体 (JPCC2015 他) や有機薄膜太陽電池の光活性層薄膜 (JPCL2015 他) および、優れた分子ワイヤー機能性を有する連結系分子など (JACS2016, ACIE2016 他)、光エネルギー変換の初期過程で生成する短寿命電荷分離状態の立体構造と電子的相互作用の同時解析を世界にさきがけて行い光エネルギー変換の分子論的起源が次々と明らかになっている。中間体立体構造解析の観点においては、小堀による量子論的解析手法によりラジカル間距離、中間体分子の位置や向きなどが従来よりも高い信頼性で得られるようになったものの、X線構造解析法のように高精度な分子構造理解ができる状況には至っていない。小堀はマイクロ波周波数がより高い (35 GHz) Qバンド時間分解 EPR 法を用いた電荷分離構造の精密解析へ転換を図っているが、一方で、高周波 EPR スペクトルには、 g 因子の異方的効果がより反映されやすくなるため、スペクトル線形から双極子間相互作用や電子的相互作用と共に立体配置を予想することが極めて困難になる。X線構造解析で提供される三次元立体画像のように、EPR スペクトル線形と一対一で対応する構造情報データを三次元映像として可視化すれば、立体構造をその空間分解能と共に明確に説明することができ、反応機構の解明につながる。また、量子論に基づく本解析手法に対する汎用性も大きく拡大する。以上の経緯から、今回、新規に電子スピン分極イメージング法を開発する挑戦に乗り出す考えに至った。

2. 研究の目的

本研究では、人工光合成など次世代のクリーンエネルギー創出に向け分子機構の解明が喫緊課題となっている様々な反応系において、反応初期過程の仕組みをオングストローム領域の三次元映像化によって明らかにする画期的な実験的方法論を開発する。高周波時間分解電子スピン共鳴法による計測から複雑な機能を有する分子集合体の初期過程で生成する電荷分離状態の中間体立体構造を、高い空間分解能にて三次元映像として可視化する「時間分解電子スピン分極イメージング法」を開発する。1) 光合成タンパク質であるホウレン草の PSII において生成する初期電荷分離状態の不对電子軌道を特定し、2) 中間体分子の距離および位置と分子配向を高い空間分解能にて画像化する。さらに、3) 不对電子軌道間の重なり大きさ (電子的相互作用) を正確に特徴付ける。以上の高精度計測から、高効率な光エネルギー変換を引き起こす根源的な分子機構の解明に挑戦する。X線回折パターンから得られる三次元構造データのように、電子スピン共鳴スペクトルと一対一で対応する構造情報データを三次元映像として可視化し、構造情報をその精度 (空間分解能) と共にわかりやすく説明するツールの提供を目標とする。

3. 研究の方法

1. 高速電子スピン共鳴システムの構築と計測

現有する Xバンド電子スピン共鳴分光器、およびナノ秒パルスレーザーを用いた。入手した膜タンパク質試料を溶解させた溶液と、タンパク質試料を基板上に塗布して得られる配向膜試料を作成した。ホウレン草から抽出した PSII チラコイド膜は、連携研究者である三野 (名大) から提供を受けた。まず溶液試料において、温調型クライオスタットシステムと、積算データ取得のシステムを構築した。これにより極低温条件でのレーザー励起時間分解 EPR 測定を行い、ナノ秒領域の時間分解 EPR スペクトルを取得した。

2. 電子スピン分極イメージング法の開発

電子スピン分極の量子力学的モデルに従い、電荷分離状態の電子的相互作用 (J)、スピン双極子間相互作用テンソル (d)、超微細相互作用テンソル (a)、 g テンソルを考慮し光電荷分離状態の時間分解 EPR スペクトルを再現した。 a テンソルに注目すると、電荷分離状態を構成する電子受容体 $\text{Pheo}_{D1}^{\bullet-}$ は窒素原子上に大きなスピン密度を持つため芳香環面外方向に大きな主値 (a_z) を持つ。この異方的効果により、外部磁場 B_0 がこの分子の面外方向を指した場合に量子力学的混合が効率よく起き、さらにこの超微細結合 (hf) によるスペクトル幅の増大が起こる。溶液中無配向試料の電子スピン共鳴スペクトルは、外部磁場の各空間的方向に対して得られる電子スピン分極信号の重ね合わせとして再現される。そこで電子スピン分極強度を各磁場ベクトル方向に分解し、この単位ベクトル終点の集合からなる球面に投影した。特定の外部磁場で生じる電子スピン分極強度を投影すると、 a_z により $\text{Pheo}_{D1}^{\bullet-}$ の Z 主軸方向に大きな正のスピン分極を示す像が得られこれにより $\text{Pheo}_{D1}^{\bullet-}$ 芳香環面外方向 (a_z 主軸方向) を決定することができた。 d テンソルではラジカル間を結ぶ方向が主軸となり、双極子間相互作用が B_0 方向に依存する。 d テンソルに起因し磁場掃印スペクトルが A/E や E/A パターンを示すスピン分極の符号は、ラジカル間を結ぶベクトル方向では負 (E 分極) となる。このため負のスピン分極が最も強い方向に電子供与体 P_{D1}^{+} が存在する (d-イメージング)。さらに、スペクトルの中心位置は g 因子の異方性 (g_x, g_y, g_z) に強く依存し、各分子の配向によって大きく変化する。注目する主値 (g_z) に対応する中心磁場強度にて同様の画像投影を行えば、 g_z 主軸方向が示され (g-イメージング)、 P_{D1}^{+} の分子配向が明らかとなる。三種の異なる異方性に対応したイメージング解析を行うことより光電荷分離状態の立体映像が作成され、ナノ秒高速時間領域で不对電子軌道分布や立体構造の視覚的变化による光エネルギー変換機構の解明ができた。電荷再結合によって生成する $^3\text{Chl}_{D1}^*$ の電子スピン分極の画像化も行い三次元映像の妥当性も評価できた。

3. 膜配向試料の解析: 電荷分離構造の三次元映像化と電子的相互作用

たことは画期的である。

ここで高等植物であるホウレン草と紅色細菌(*Rhodobacter sphaeroides* R26)の両者について、我々が明らかにした反応中心部位における初期電荷分離構造を比較してみる(図3)。PSIIでは正孔が P_{D1}^+ に局在し電子(Pheo^-)と正孔間の電荷分離距離(r_{CC})が1.5ナノメートルであるのに対し、紅色細菌でのフェオフェチンとクロロフィル二量体間の電荷分離距離は1.8ナノメートルであった(図3b)。一方で電子と正孔の電子軌道の重なりで生じる電子的相互作用は、PSIIの方が紅色細菌のものより十分小さく、電荷分離寿命もより長かった。電荷同士の距離が近いにもかかわらず軌道の重なりが抑制的であることは、トンネル効果として電子伝達を媒介する図3aのアクセサリクロロフィル(Chl_{D1})との相互作用(V_A)が著しく弱いことを示している。我々は、

この要因としてフェオフェチンの末端置換基が生物種によって異なることに起因すると結論した。図3aのPSIIでは末端置換基としてビニル基 $-\text{CH}=\text{CH}_2$ を用いているのに対し、紅色細菌(図3b)では、アセチル基 $-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{O}$ を有している。図3bの末端アセチル基は電子吸引力が高く Pheo^- においてカルボニル酸素に不對電子密度が生じるためクロロフィルとの強い相互作用($V_A=135\text{ cm}^{-1}$)が生まれ、電子が戻る再結合反応を起こしやすい。一方でPSII色素が持つビニル基は電子吸引力がより低いため Pheo^- 末端部位に不對電子密度があまり生じず、電子が戻る通り道を高い壁で阻んだ状態になる。この絶縁性のため Chl_{D1} との相互作用($V_A=45\text{ cm}^{-1}$)は弱く、電荷再結合による電荷の損失を防ぐことができる。

以上により、光合成細菌から高等植物へと進化し水を酸化分解するにまで至った起源には、光合成による水分解の酸化力を発揮する高い電荷分離エネルギーを再結合反応で失わせないように、末端置換基をビニル基に置き換え電子の流れを調整したことが一つの大きな要因になったと考えられる。

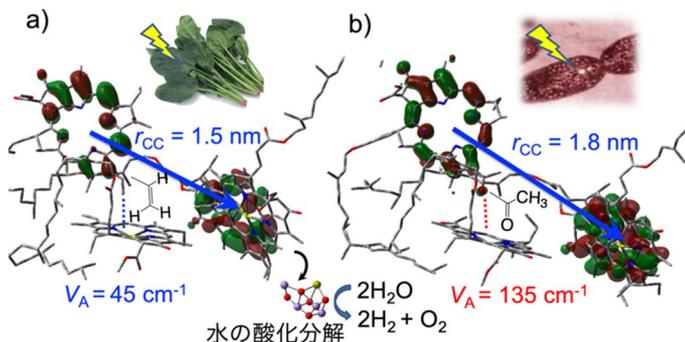


図3 光化学系II複合体と紅色細菌に生成した初期電荷分離状態の立体配置の比較

a)PSIIの光電荷分離状態を構成し負電荷を生じる Pheo_{D1} 末端ビニル基($-\text{CH}=\text{CH}_2$)は隣接する Chl_{D1} クロロフィルに近接するが絶縁性のため電荷再結合によるエネルギー損失が起きない。高い酸化力を持つため、正孔はマンガククラスターを後続的に酸化し水の酸化分解を可能にしている。b)紅色細菌では、末端アセチル基 $-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{O}$ が隣接するクロロフィルと強く相互作用し電荷再結合が起こりやすい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ema Fumitoshi, Tanabe Mana, Saito Shohei, Yoneda Tomoki, Sugisaki Kenji, Tachikawa Takashi, Akimoto Seiji, Yamauchi Seigo, Sato Kazunobu, Osuka Atsuhiko, Takui Takeji, Kobori Yasuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Charge-Transfer Character Drives Mobius Antiaromaticity in the Excited Triplet State of Twisted [28]Hexaphyrin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2685 ~ 2690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcclett.8b00740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Hayato, Inaya Ryutarō, Nagashima Hiroki, Nakamura Shunta, Kobori Yasuhiro, Tkachenko Nikolai V., Hasobe Taku	4. 巻 9
2. 論文標題 Multiexciton Dynamics Depending on Intramolecular Orientations in Pentacene Dimers: Recombination and Dissociation of Correlated Triplet Pairs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3354 ~ 3360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcclett.8b01184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nagashima Hiroki, Kawaoka Shuhei, Matsui Yasunori, Tachikawa Takashi, Ikeda Hiroshi, Kobori Yasuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Time-Resolved EPR Study on Singlet-Fission Induced Quintet Generation and Subsequent Triplet Dissociation in TIPS-Phenyl-Tetracene Aggregates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 163 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.31.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nagashima Hiroki, Kawaoka Shuhei, Akimoto Seiji, Tachikawa Takashi, Matsui Yasunori, Ikeda Hiroshi, Kobori Yasuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Singlet-Fission-Born Quintet State: Sublevel Selections and Trapping by Multiexciton Thermodynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 5855 ~ 5861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcclett.8b02396	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lubert-Perquel Daphne, Salvadori Enrico, Dyson Matthew, Stavrinou Paul N., Montis Riccardo, Nagashima Hiroki, Kobori Yasuhiro, Heutz Sandrine, Kay Christopher W. M.	4. 巻 9
2. 論文標題 Identifying triplet pathways in dilute pentacene films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4222 ~ 4222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-06330-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura Shunta, Sakai Hayato, Nagashima Hiroki, Kobori Yasuhiro, Tkachenko Nikolai V., Hasobe Taku	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantitative Sequential Photoenergy Conversion Process from Singlet Fission to Intermolecular Two-Electron Transfers Utilizing Tetracene Dimer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 26 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.8b01964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuta Yamamoto, Takumi Ako, Takashi Tachikawa, Itaru Osaka, Yasuhiro Kobori	4. 巻 30
2. 論文標題 Time-Resolved EPR Study on Photoinduced Charge-Transfer Trap State in Thiophene-Thiazolothiazole Copolymer Film	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Photopolym. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 551 555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.30.551	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa Masashi, Nagashima Hiroki, Minobe Reina, Tachikawa Takashi, Mino Hiroyuki, Kobori Yasuhiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Regulated Electron Tunneling of Photoinduced Primary Charge-Separated State in the Photosystem II Reaction Center	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1179 ~ 1184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.7b00044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobori Yasuhiro, Ako Takumi, Oyama Shinya, Tachikawa Takashi, Marumoto Kazuhiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Transient Electron Spin Polarization Imaging of Heterogeneous Charge-Separation Geometries at Bulk-Heterojunction Interfaces in Organic Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 13472 ~ 13481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b02672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsui Yasunori, Kawaoka Shuhei, Nagashima Hiroki, Nakagawa Tatsuo, Okamura Naoki, Ogaki Takuya, Ohta Eisuke, Akimoto Seiji, Sato-Tomita Ayana, Yagi Shigeyuki, Kobori Yasuhiro, Ikeda Hiroshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Exergonic Intramolecular Singlet Fission of an Adamantane-Linked Tetracene Dyad via Twin Quintet Multiexcitons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 18813 ~ 18823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b04503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saegusa Toshiyuki, Sakai Hayato, Nagashima Hiroki, Kobori Yasuhiro, Tkachenko Nikolai V., Hasobe Taku	4. 巻 141
2. 論文標題 Controlled Orientations of Neighboring Tetracene Units by Mixed Self-Assembled Monolayers on Gold Nanoclusters for High-Yield and Long-Lived Triplet Excited States through Singlet Fission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 14720 ~ 14727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b06567	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Saki, Oyama Shinya, Kobori Yasuhiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Electron spin polarization generated by transport of singlet and quintet multiexcitons to spin-correlated triplet pairs during singlet fissions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 2934 ~ 2942
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SC04949E	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 13件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Time-Resolved EPR Study on Singlet Fission and Subsequent Triplet Dissociation Dynamics
3. 学会等名 The 35th International Conference of Photopolymer Science and Technology Materials & Processes for Advanced Microlithography, Nanotechnology and Phototechnology (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Time Resolved EPR Study on Photoinduced Charge-Transfer Trap States in Thiophene-Thiazolothiazole Copolymers Films
3. 学会等名 233rd ECS Meeting (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Singlet-Fission-Born Quintet State: Sublevel Selections and Trapping by Multiexciton Thermodynamics
3. 学会等名 Spin Physics, Spin Chemistry, Spin Technology (SPCT2018) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Geometry and motion of secondary charge-separated states in Cryptochrome
3. 学会等名 4th Kanto Area Spin Chemistry Meeting (4th KASC) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 時間分解電子スピン共鳴法を用いた光エネルギー変換初期過程の観測
3. 学会等名 第19回分子分光研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Three-Dimension Visualizations of Electron Spin Polarization for Elucidating Photo-Energy Conversion Mechanisms
3. 学会等名 The 6th OCU International Workshop on Quantum Chemistry/Quantum Chemical Calculations on Quantum Computers: Quantum Algorithms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Electron Spin Polarization Imaging Analyses of Primary Charge Separations in Photosynthesis
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Time Resolved EPR Study on Photoinduced Charge-Separations in Thin Films of Thiophene-Thiazolothiazole Copolymer
3. 学会等名 The 34th International Conference of Photopolymer Science and Technology Materials & Processes for Advanced Microlithography, Nanotechnology and Phototechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Time-Resolved EPR Study on Charge Dynamics of Electron-Hole Pairs in Lead Iodide Perovskite Thin Film
3. 学会等名 231st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 "Electron spin polarization imaging applied to primary charge separation in the PSII Yasuhiro Kobori"
3. 学会等名 The 5th Awaji International Workshop on Electron Spin Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Electron Spin Polarization Imaging of Photoinduced Primary Charge-Separated States in PSII
3. 学会等名 Spin Chemistry Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Kobori
2. 発表標題 Time-Resolved EPR Study on Photoinduced Charge-Transfer Trap States in Thiophene-Thiazolothiazole Copolymer Films
3. 学会等名 11th Japanese-Russian Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小堀康博
2. 発表標題 光合成初期反応の電子スピン画像解析
3. 学会等名 第四回森野ディスカッション（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>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 http://www.kobe-u.ac.jp/NEWS/research/2017_03_01_01.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	三野 広幸 (Mino Hiroyuki) (70300902)	名古屋大学・理学研究科・准教授 (13901)	