

## 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25年 6月 9日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22550009

研究課題名（和文）太陽光エネルギー変換を行うナノ有機分子システムの電子伝達機能

研究課題名（英文）Electron Transport Functions for Solar Energy Conversions in Nanometer-Scaled Organic Molecular Systems

研究代表者

小堀 康博 (KOBORI YASUHIRO)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：00282038

研究成果の概要（和文）：効率のよい光－化学エネルギー変換を行う分子素子を設計する上で、電子ドナー(D)－アクセプター(A)系における立体構造および電子状態がどのように電荷分離および電荷再結合過程を制御できるのかに大きな関心が持たれる。本研究では、時間分解電子スピン共鳴法を駆使し、様々な機能性分子やタンパク質および有機薄膜太陽電池の系において生成する光電荷分離状態の分子立体構造および電子的相互作用の解析を進めた。

研究成果の概要（英文）：For development of the molecular solar-energy conversion systems, it is crucial to investigate how both the molecular geometry and the electronic structure of electron donor-acceptor (D-A) molecules contribute to the electronic coupling for the charge-separation (CS) and for the charge-recombination (CR) processes. In this study, we have developed theoretical methods to analyze the electron spin polarization detected by the time-resolved electron paramagnetic resonance (TREPR) spectroscopy for D-A systems to systematically characterize both the molecular geometry and the electronic coupling of the photoinduced charge-separated state in the electron donor-acceptor (D-A) molecular systems for several D-A systems in photoactive proteins and in the active layers of the organic thin-film solar cells.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：太陽光、エネルギー変換、光電荷分離状態、立体配置、電子的相互作用、人工光合成、時間分解電子スピン共鳴、フラーレン

## 1. 研究開始当初の背景

光合成反応中心タンパク質のように高い効率で光を化学エネルギーに変換する分子

ワイヤーを構成し、高効率の光エネルギー変換システム構築を目指す研究が先進国各地で盛んに進められている。高い効率で太陽光

を化学エネルギーに変換するナノ有機分子システムを合理的に設計するには、光エネルギー変換プロセスに重要な役割を果たす光電荷分離状態の電子構造や立体的配置と電子的相互作用との関係を明らかにすることが極めて重要である。しかしながら、このようなナノスケールの分子素子において、短寿命電荷分離状態における立体配置などの精密構造と電子的相互作用とを同時に求めた研究例は極めて少ない。したがって光エネルギー変換効率に極めて重要な電子的相互作用に対する立体構造や励起状態の電子軌道対称性などの分子論的役割について明らかになっていない。

小堀は、光誘起電子移動反応で生成する長距離電荷分離状態の交換相互作用が電子的相互作用に支配されていることを世界に先駆けて初めて具体的に示した。(電荷移動相互作用機構: Kobori et al. *JPCA* 1998, *JCP* 1999, *JACS* 2001, *JPCB* 2004.) さらに小堀はこの機構を用いて、フラレン-金属ポルフィリン連結分子の多段階光誘起電荷分離過程における時間分解電子スピン共鳴測定によって、短寿命電荷分離状態における立体構造および電子的相互作用の定量化を行うことに成功した。(Kobori et al. *PNAS* 2005.)

元来電荷分離状態における精密な立体構造解析には、電子スピン共鳴法が最も有力な手段として位置づけられ、光合成反応中心タンパク質などに応用されていたが、対象が励起一重項状態を経由する反応系に限られていた。励起三重項状態を経由して生成した電荷分離過程を時間分解電子スピン共鳴法で観測する場合、三重項生成過程である項間交差の異方性が三重項電荷分離状態のスピン量子状態分布に射影されるものと考えられてきた(三重項-三重項スピン分極移動)。このような考えのもと、最近小堀はフラレンとポルフィリンをジフェニルジシランで連結した人工光合成系分子の光電荷分離状態において連結部位のフレキシブルな立体配置を反映した複数の立体異性体に対してそれぞれの電子的相互作用を同時に特徴づけた。(Kobori et al. *JACS* 2009.)

当初まで、三重項-三重項スピン分極移動の量子論的解釈はまだ確立されていなかった。小堀は、励起三重項状態に生成する量子コヒーレンスがどのように電荷分離状態の電子スピン共鳴スペクトルに反映されるかを世界で初めて量子論によって表し、実験結果を含む具体例とともに 2009 年 8 月に行われた第 11 回スピン化学国際会議で口頭発表した。この成果は様々な三重項前駆体反応系において光電荷分離状態の立体構造や電子的相互作用を決定するための極めて重要な基本原理を示した成果として高い関心を集めた。

## 2. 研究の目的

時間分解電子スピン共鳴法を用いて、フラレンとポルフィリン誘導体をオリゴシランで連結した人工光合成分子や光触媒分子、有機薄膜太陽電池において、光電荷分離状態の測定を行う。小堀がごく最近理論的に示したスピン分極移動機構を用い、短寿命電荷分離状態における距離を含む立体配置の精密構造と交換相互作用とを同時に求める。交換相互作用パラメータから電子的相互作用の値を求める。様々な Si-Si 結合数( $n = 1 \sim 5$ )を有する連結分子系において、各立体異性体の立体配置に対して電子的相互作用を求める。また、人工光合成分子の構成単位であるフラレン部位の励起三重項状態について、時間分解電子スピン共鳴スペクトルに対する温度効果を観測する。エネルギー的に近接した二つの励起三重項状態の動的混合過程について、スピン分極移動機構を応用した新しい理論を構築する。このモデルによるスペクトル線形解析を行い、それぞれの電子軌道の対称性を決定する。これらの励起三重項を経由する電荷分離速度をそれぞれ求め、励起三重項における不對電子軌道の対称性が電子伝達効率に対してどのような影響を与えるのかを測定する。以上の測定から、電子的相互作用に対する立体構造や励起状態の電子軌道対称性および共役を形成するスパーサー電子状態の分子論的役割を具体的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

平成 22 年度では、様々な鎖長を持つオリゴシラン( $n = 1 \sim 5$ )で連結したフラレン-ポルフィリン分子のレーザー光励起によって生成する光電荷分離状態の時間分解電子スピン共鳴測定を行った。オリゴシランで連結したフラレン-ポルフィリン分子およびそれらの構成単位となるフラネロピロリジン類は研究協力者である辻 勇人 准教授らにより合成された。一方で、小堀は三重項-三重項スピン分極移動機構を確立させ学術誌に報告した。(Kobori et al. *JPCB* 2010.) この機構を用い、短寿命電荷分離状態における距離を含む立体配置の精密構造と交換相互作用とを同時に求めた。試料をベンズニトリルに溶かし、freeze-pump-thaw サイクルで冷却脱気した。X-band 時間分解 EPR 測定は、Bruker EMX および Jeol JES-FE2XG により行った。液体窒素デュアー内で冷却した窒素ガスをキャビティー内の試料管に吹き付けることにより試料溶液を凍結状態にした。試料温度は窒素ガスの流量によって制御した。Nd:YAG レーザー(Continuum, Minilite II, fwhm  $\sim 5$  ns) 532 nm を偏光解消板に通したものを励起光として用いた。

また、ヒトの血液中に豊富に含まれる薬物輸送タンパク質(ヒト血清アルブミン)とアントラキノン誘導体(AQ1S)との複合体試

料を作製し、光によって電子伝達を担う反応中間体（アントラキノンアニオンラジカル）を人工的に効率よく生成させることに成功した。この光反応で生成する光電荷分離状態をナノ秒パルスレーザー励起による時間分解電子スピン共鳴分光法で観測し、小堀が確立した三重項-三重項スピン分極移動機構を用いて電荷分離状態における立体構造と電子的相互作用の決定を行った。電子スピン共鳴スペクトルについて、外部磁場  $B_0$  の方向を基準とした入射レーザー  $L$  の偏光方向の効果を観測することによってさらに高い精度で立体配置の特定が可能となった。

平成 23 年度以降は、有機薄膜太陽電池の光活性層について、光電荷分離機構の解明のため、有機半導体であるポリチオフェン (P3HT) とフラレン誘導体 (PCBM) で構成されるブレンド膜を真空脱酸素条件下で作成した。置換基が規則的に並んだ head to tail 型の regioregular P3HT(RR-P3HT) と PCBM を質量比 1:1 で 1,2-ジクロロベンゼンに溶解させ、真空ラインで脱酸素した後溶媒を除去することによりブレンド膜試料を作製した。また、置換基が不規則に並んだ regiorandom P3HT(RRa-P3HT) と PCBM のブレンド膜試料も同様の手順で作製した。これらの試料についてそれぞれ Nd:YAG レーザー (532 nm) を励起光として用いて  $T = 77$  K の条件下で TREPR 測定を行った。RR-P3HT/PCBM ブレンド膜試料については、130 °C で 30 分間熱アニール処理を施した試料についても測定を行った。ナノ秒領域で生成した光電荷分離状態について、磁気異方性の影響を受け時間発展するスピン量子コヒーレンスの効果を考慮に入れた時間分解 EPR 信号の解析手法を確立させた。この手法を用い、得られた電子スピン共鳴信号の解析を進めた。さらに有機薄膜太陽電池の初期過程で生じる電荷分離の動力学を分子論的に明らかにするために、得られる時間分解電子スピン共鳴信号に対する温度効果や試料熱アニール効果の測定を行った。また、スピンコート法を用いて様々な条件下において P3HT:PCBM 系の薄膜試料を作成した。P3HT-PCBM ブレンド膜(質量比 1:1)はスピンコート法(3000 rpm, 30 s)により作成した。熱アニール処理の効果を可視紫外吸収スペクトルと時間分解 EPR により観測した。

#### 4. 研究成果

オリゴシラン ( $n = 1 \sim 5$ ) で連結したフラレン-ポルフィリン分子について光電荷分離状態の時間分解 EPR スペクトルを観測した。確率リュービル方程式により、三重項機構とよばれる電子スピン分極は、外部磁場存在下において初期励起三重項状態に生成する量子コヒーレンスの三重項電荷分離に伴う消失によることを理論的に示した。このコヒー

レンスの消失は、電荷分離速度がゼーマンエネルギーによる歳差運動よりも遅い時に起こることが示された。これは化学反応が起きる間にコヒーレンス項の振動が多数発生することによる平均化の効果として説明される。このような理論に基づき、フラレン-ポルフィリン分子において生成する種々の電荷分離状態について時間分解 EPR スペクトルの再現を行い、各立体異性体に対して、電荷分離状態の立体構造と電子的相互作用を決定した。ジフェニルジシランをスペーサーとするフラレン-ポルフィリン分子の分子内電荷分離状態について得られた電子的相互作用 ( $0.7 \text{ cm}^{-1}$ ) は、スペーサー長がほぼ同一のジフェニルアミドスペーサーを用いた場合よりも小さいことが分かった。この違いは、超交換機構による長距離電子移動を媒介するスペーサー部位の LUMO 軌道のエネルギー準位の差によって説明され、ケイ素間の  $\sigma$  結合に関与する電子軌道の非局在化が電子伝達のワイヤーとしての機能をもたらすことが具体的に明らかになった。

薬物輸送タンパク質 (ヒト血清アルブミン) とアントラキノン誘導体 (AQ1S) との複合体試料においては、時間分解 EPR スペクトルから、幅の広いスペクトル成分とシャープな成分で構成され、両者のスペクトル幅から、反応距離が約 0.6 nm および、約 1.1 nm が見積もられ、距離が異なる 2 つのアミノ酸残基からの電子移動反応が明らかになった。これまで、光照射直後に近傍の分子間距離で生じた電荷分離状態において中間体分子の位置や向きおよび、電子軌道の重なり の性質を正確に決めた例はなかった。ここでは、電子スピン共鳴スペクトルについて、外部磁場  $B_0$  の方向を基準とした入射レーザー  $L$  の偏光方向の効果を観測した。以上のデータについて小堀が確立した三重項-三重項スピン分極移動機構を用い解析を行い、電子伝達分子として機能するラジカルの空間的な位置や向き、および電子軌道の重なり の大きさが同時に明らかにされた。AQ1S の遷移双極子モーメント  $M$  は AQ1S 面内にあり C=O 軸方向に対して  $51^\circ$  の向きであった。この角度は、密度汎関数法で得られた  $^1\pi\pi^*$  の遷移双極子モーメントの向きとほぼ一致し、可視紫外吸収分光測定で得られたモル吸光係数の値 ( $\sim 10^3 \text{ cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ ) をよく説明した。反応距離が 0.6 nm の電荷分離状態の立体配置ではアミノ酸残基の位置が AQ1S の C=O 軸方向にあり、AQ1S とヒスチジン残基の芳香環が互いに直交した配置であることが分かった。同時に、交換相互作用の値から得られた電荷分離状態の電子的相互作用は  $5 \text{ cm}^{-1}$  程度であり、極めて小さいことが明らかになった。この結果、直交した中間体分子対の立体配置が電子雲の重なりを大きく抑制し、もとの安定な分子に

戻らないようにすることによって効率よく光エネルギー変換を起こす様子が初めて明瞭に捉えられた。さらに、電子スピン共鳴信号の減衰の解析から得られた電荷再結合速度( $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ )は、極めて小さい値であり、電子雲の重なりが大きく抑制されてもとの安定な分子に戻らないということを強く支持する結果であった。

有機薄膜太陽電池の光活性層を形成する有機半導体混合膜の光照射によって生成する長距離電荷分離状態の立体構造、電子の相互作用および分子運動を世界で初めて特徴付けた。得られた電荷分離状態の構造と運動性から、有機半導体のフォノンによる分子運動や固体膜試料の格子振動が電荷分離過程を発熱的に促進させるエントロピー増大効果を与えることが具体的に明らかになった。同時に、光電荷移動反応直後に生じる電子-フォノン相互作用が、イオン対における静電引力の束縛を振り切る高効率な光電流生成に極めて重要な役割を果たすことが示された。この成果は、有機太陽電池による電流生成の基本原則を世界にさきがけて示したものであり、太陽電池の高効率化に向けた分子設計やデバイス構造設計への応用に大きな期待が寄せられる。

#### 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6件)

1. Y. Kobori, R. Noji, S. Tsuganezawa: Initial Molecular Photocurrent: Nanostructure and Motion of Weakly Bound Charge-Separated State in Organic Photovoltaic Interface *J. Phys. Chem. C* 117 (4), 1589-1599 (2013). 査読有 DOI:10.1021/jp102330a
2. R. Carmieli, A. Smeigh, S. M. Conron, A. Thazhathveetil, M. Fuki, Y. Kobori, F. Lewis, M. Wasielewski: Structure and Dynamics of Photogenerated Triplet Radical Ion Pairs in DNA Hairpin Conjugates with Anthraquinone End Caps *J. Am. Chem. Soc.* 134 (27), 11251-11260 (2012). 査読有 DOI: 10.1021/ja303721j
3. 小堀康博 レビュー 「タンパク質の光エネルギー変換機構：光電荷分離のダイナミクスと構造解析の最前線」*光化学*, 43, 134-141 (2012). 査読なし ISSN : 0913-4689
4. Y. Kobori, M. Fuki: Protein-Ligand Structure and Electronic Coupling of Photoinduced Charge-Separated State: 9,10-Anthraquinone-1-Sulfonate Bound to Human Serum Albumin *J. Am. Chem. Soc.* 133 (42), 16770-16773 (2011). 査読有

DOI: 10.1021/ja206898j

5. K. Yamanishi, M. Miyazawa, T. Yairi, S. Sakai, N. Nishina, Y. Kobori, M. Kondo, F. Uchida : Conversion of Cobalt(II) Porphyrin into a Helical Cobalt(III) Complex of Acyclic Pentapyrrole *Angew. Chem.-Int. Edit.*, 50 (29), 6583-6586 (2011). 査読有
6. Y. Kobori, M. Fuki, H. Murai: Electron Spin Polarization Transfer to the Charge-Separated State from Locally Excited Triplet Configuration: Theory and Its Application to Characterization of Geometry and Electronic Coupling in the Electron Donor-Acceptor System *J. Phys. Chem. B* 114 (45), 14621-14630 (2010). 査読有 DOI: 10.1021/jp102330a

[学会発表] (計31件)

1. 山下幸実・三野広幸・小堀康博 「光合成光化学系II反応中心における初期電荷分離状態のダイナミクス」第93春期日本化学会年会 2013年3月25日 立命館大学(草津市)
2. Yasuhiro Kobori “Connection between Protein Nanostructures and Electronic Couplings in Photoinduced Charge-Separated States” 8th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (invited) 2012年10月12日 Beijing, China
3. Yasuhiro Kobori “Connection between Protein Nanostructures and Electronic Couplings in Photoinduced Charge-Separated States” 2012年9月13日 2012年光化学討論会, Symposium “Photo-induced Electron and Spin Dynamics in Nanoscale Materials and Systems” 東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都)
4. Yasuhiro Kobori “Structure and Electronic Coupling of Photoinduced Charge-Separated States Bound in Photovoltaic Donor-Acceptor Bulk Heterojunction Interfaces” The Second International Symposium on Electron Spin Science 2012年7月23日 Hotel Taikanso (松島市)
5. 小堀康博・野路竜平 「ポリチオフェン-フラレン混合膜に生成する電荷分離状態と電荷分離ダイナミクス」第50回電子スピンサイエンス学会年会 2011年11月18日 仙台国際センター (仙台市)
6. 婦木正明・村井久雄・小堀康博 「ヒト血清アルブミン-キノン複合体における長距離光電荷分離状態の立体配置と電子的相互作用」第50回電子スピンサイエンス学会年会 2011年11月16日 仙台国際センター (仙台市)
7. 津金澤秀平・野路竜平・永田浩人・小堀

- 康博 「ポリチオフェン-フラレンブレンド膜の時間分解 EPR」第 50 回電子スピ  
ンサイエンス学会年会 2011 年 11 月 16  
日 仙台国際センター (仙台市)
8. 青野志保・小堀康博・近藤徹・三野広幸・  
Nina Ponomarenko・James R.Norris Jr. 「光  
合成反応中心における初期電荷分離状態  
の観測」第 50 回電子スピサイエンス学  
会年会 2011 年 11 月 16 日 仙台国際セ  
ンター (仙台市)
  9. 永田浩人・辻 勇人・玉尾皓平・村井久  
雄・小堀康博 「フラレン-亜鉛ポルフィ  
リン連結分子に生成する光電荷分離状  
態の電子的相互作用に対するオリゴシラ  
ンスペーサー分子骨格構造の効果」第 5  
0 回電子スピサイエンス学会年会  
2011 年 11 月 16 日 仙台国際センター(仙  
台市)
  10. Yasuhiro Kobori, Masaaki Fuki  
“Orientational Structures and Electronic  
Couplings of the Photoinduced  
Charge-Separated States in Proteins”  
International Workshop “Advanced ESR  
Studies for New Frontiers in Biofunctional  
Spin Science and Technology” 2011 年 11 月  
13 日 神戸大学 (神戸市)
  11. 片桐秀輔・小堀康博・近藤徹・三野広幸  
「光合成光化学系 II 反応中心の初期電荷  
再結合ダイナミクスと電子スピン緩和機  
構」第 49 回電子スピサイエンス学会年  
会 2010 年 11 月 12 日 名古屋大学(名  
古屋市)
  12. 鈴木みなみ・柴野祐紀・辻勇人・村井久  
雄・玉尾皓平・小堀康博 「オリゴシラ  
ンで連結した亜鉛ポルフィリン-フラ  
レン分子の光電荷分離状態」第 49 回電  
子スピサイエンス学会年会 2010 年 11  
月 12 日 名古屋大学 (名古屋市)
  13. 松下健士郎・小堀康博 「タンパク質にバ  
インドした励起三重項状態の分子運動」  
第 49 回電子スピサイエンス学会年会  
2010 年 11 月 11 日 名古屋大学(名古  
屋市)
  14. Masaaki Fuki, Hisao Murai, Yasuhiro Kobori  
“Orientational structure and electronic  
coupling of photoinduced charge-separated  
states in Human Serum Albumin -  
Anthraquinone-1-Sulfonate Complex” Joint  
of Morino Lecture and International  
Workshop “Spectroscopy on Photoinduced  
Functions of Electrons and Spins in Biology  
and Material Science” 2011 年 10 月 13 日  
東京工業大学大岡山キャンパス (東京都)
  15. 永田浩人・辻 勇人・玉尾皓平・村井久  
雄・小堀康博 「フラレン-亜鉛ポルフィ  
リン連結分子に生成する光電荷分離状  
態の電子的相互作用に対するオリゴシラ  
ンスペーサー分子骨格構造の効果」2011  
年光化学討論会 2011 年 9 月 8 日 宮崎  
市湖畔コンベンションエリア (宮崎市)
  16. 婦木正明・村井久雄・小堀康博 「ヒト  
血清アルブミン-キノン複合体の光照射  
で生成した電荷分離状態の立体配置と電  
子の相互作用」2011 年光化学討論会  
2011 年 9 月 8 日 宮崎市河畔コンベンシ  
ョンエリア
  17. 小堀康博・野路竜平 「ポリチオフェン-  
フラレン混合膜に生成する光電荷分離  
状態の立体構造とダイナミクス」2011 年  
光化学討論会 2011 年 9 月 6 日 宮崎市  
湖畔コンベンションエリア (宮崎市)
  18. 野路竜平・小堀康博 「P3HT-PCBM ブレ  
ンド膜接合面に生成する光電荷分離状態  
の立体構造」第 8 回「次世代の大陽光発  
電システム」シンポジウム 2011 年 6 月  
30 日 岐阜じゅうろくプラザ (岐阜市)
  19. 野路竜平、小堀康博 「ポリチオフェン-  
フラレンブレンド膜に生成する長距離  
電荷分離状態」第 15 回 ESR フォーラム  
2011 年 6 月 17 日 コンソーシアム大阪  
(大阪市)
  20. 小堀康博 「時間分解 EPR を用いたタン  
パク質の光エネルギー変換機能の解析」  
第 15 回 ESR フォーラム 2011 年 6 月 17  
日 コンソーシアム大阪 (大阪市)
  21. Yasuhiro Kobori, Masaaki Fuki, and Ryohei  
Noji “Orientational Structures and  
Electronic Couplings of Photoinduced  
Charge-Separated States in Proteins and  
Organic Films” Spin Chemistry Meeting  
2011 2011 年 5 月 16 日オランダ デウイ  
ットラアフホテル
  22. Ryohei Noji, Yasuhiro Kobori  
“Time-resolved EPR study on geometry of  
photoinduced charge-separated states in  
polythiophene/fullerene blend films” Spin  
Chemistry Meeting 2011 2011 年 5 月 16  
日 オランダ デウイットラアフホテル
  23. 野路竜平 小堀康博 亜鉛ポルフィリン  
が吸着した酸化チタンナノ粒子表面に生  
成する光電荷分離状態 日本化学会第 91  
春季年会 2011 年 3 月 28 日 神奈川大  
学 横浜キャンパス (横浜市)
  24. 小堀康博 「光電荷分離状態の立体配置  
と光電変換機能」日本化学会第 91 春季年  
会 2011 年 3 月 28 日 神奈川大学 横  
浜キャンパス (横浜市)
  25. 婦木正明 村井久雄 小堀康博 「ヒト  
血清アルブミン-キノン複合体における  
光反応で生成したラジカル対の立体配  
置」日本化学会第 91 春季年会 2011 年  
3 月 28 日 神奈川大学 横浜キャンパス  
(横浜市)
  26. 鈴木みなみ・柴野祐紀・辻勇人・村井久

- 雄・玉尾皓平・小堀康博「時間分解電子スピン共鳴法を用いたオリゴシラン共役スペーサーによる分子ワイヤー機能の解明」日本化学会第 91 春季年会 2011 年 3 月 28 日 神奈川大学 横浜キャンパス (横浜市)
27. 永田浩人・柴野祐紀・辻 勇人・玉尾皓平・村井久雄・小堀康博 「環状アルキル鎖でスペーサー構造を制限したオリゴシラン連結フラニールポルフィリン系における光電荷分離状態の交換相互作用」第 49 回電子スピンサイエンス学会年会 2010 年 11 月 12 日 名古屋大学 (名古屋市)
28. Yasuhiro Kobori, Masaaki Fuki “Orientational Structures and Electronic Couplings of Photoinduced Charge-Separated States in Human Proteins” (invited) International Conference "Spin physics, spin chemistry, and spin technology" 2010 年 11 月 3 日 Kazan (ロシア共和国)
29. Yasuhiro Kobori “Time-Resolved EPR Characterizations of Geometries and Electronic Couplings in the Photoinduced Charge-Separated States of Porphyrin-Fullerene Dyads Bridged by Oligosilanes” 7th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (invited) 2010 年 10 月 14 日 済州国際会議場 済州島 大韓民国
30. 小堀康博 電子スピン分極を利用したタンパク質の立体構造解析 平成 22 年度化学系学協会東北大会 物理化学コロキウム特別企画「生体系のスピン科学」2010 年 9 月 26 日 岩手大学 (盛岡市)
31. 小堀康博 オリゴシランで連結したフラニールポルフィリンの光電荷分離状態における電子的相互作用 2010 年光化学討論会 2010 年 9 月 10 日 千葉大学 (千葉市)

[図書] (計 3 件)

1. 小堀康博 「タンパク質による光エネルギー変換機構：レーザー励起時間分解電子スピン共鳴法を用いた立体構造解析」光技術コンタクト, 50, 11-16 (2012)
2. 小堀康博 婦木正明: 最新のトピックス 「タンパク質によるエネルギー変換のしくみ-人工光合成に向けて」化学, 化学同人, 京都, Vol .67, No. 2, 70-71, (2012)
3. 小堀康博 三共出版 「配位化合物の電子状態と光物性」(第 8 章 光誘起電子移動) 2010 年

[その他]

ホームページ等

<http://www.solar.jst.go.jp/result/2ki/0>

4. html

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20111006-1/>

<http://www.shizuoka.ac.jp/public/news/detail.html?CN=872&PG01=us02>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小堀 康博 (KOBORI YASUHIRO)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：00282038

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし