

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2005～2008

課題番号：17204026

研究課題名（和文）人工光合成色素蛋白複合体超分子配列の機能統御

研究課題名（英文）Functional Control of the Supra-Molecular Arrays of Artificial Photosynthetic Pigment-Protein Complexes

研究代表者

橋本 秀樹 (HASHIMOTO HIDEKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50222211

研究成果の概要：紅色光合成細菌のアンテナ色素蛋白複合体の再構成技術を確立し、色素構造を改変した人工の光合成色素蛋白複合体の創成に成功した。異種の光合成細菌から調製したアンテナ系色素蛋白複合体を脂質 2 分子膜に再構築した人工光合成膜試料の作成に成功し、色素蛋白複合体の配列様式の決定と光機能の評価を達成した。光合成色素および色素蛋白複合体の超高速コヒーレント分光計測を達成し、光励起後の超高速緩和過程およびエネルギー伝達過程に関する新知見を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2006年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2007年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
年度			
総計	38,300,000	11,490,000	49,790,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光合成・色素蛋白複合体・超高速レーザー分光・顕微分光・超分子配列・人工光合成膜・人工光合成・光機能統御

1. 研究開始当初の背景

光合成細菌の光合成系は、自然が創造した超高速 (100 フェムト秒以下) かつ高効率 (~100%) な光エネルギー変換機構を解明するための本質的なバイオナノデバイスであるばかりでなく、その機構を解明することは太陽光エネルギーの有効利用と言う観点から眺めた場合、人類の存亡に関わる根源的な問題解決に向けての急務な研究対象である。光合成初期過程の機能発現には、周辺アンテナ (LH2)、コアアンテナ (LH1) と呼ばれる 2

種類のアンテナ色素蛋白複合体と光反応中心複合体 (RC) の合計 3 種類の色素蛋白複合体が関係している。高分解能原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた光合成膜のその場観察により、これら 3 つの色素蛋白複合体が自己組織化により集積した巨大な単一分子様の超分子配列が機能発現に密接に関係している様相が明らかにされつつある。

困難とされる、膜蛋白質の X 線結晶構造解析が達成され、LH2 及び RC に関しては、原子スケール分解能でその構造が決定されて

いる。また RC-LH1 コア複合体に関しては、3.8 Å の分解能ながら、LH1 が RC を取り囲んでいる構造解析の結果が報告されている。我々のグループによる光合成膜の電子顕微鏡観察で、RC-LH1 コア複合体が細密充填構造を持ち配列している様子が確認されている。また、脂質二分子膜にコア複合体を再構築した試料（人工光合成膜）に関しても、コア複合体のリング構造を同定できる画像取得に成功している。十分に精製したコア複合体のみを適切な脂質二分子膜に再構築することにより、各複合体が自発的に会合し、二次元格子を形成することは既知である。従来の研究では、単離した色素蛋白複合体に関してのみ、精密な時間分解分光計測が適応されており、光合成膜上での色素蛋白複合体の分子配列を確認しながら、その光機能を実時間で計測した研究の報告例は皆無である。

2. 研究の目的

天然由来の色素蛋白複合体及び精密有機合成の技術を駆使して色素構造を改変した人工の色素蛋白複合体を脂質二分子膜に任意の比率で自己集積した試料を対象にして、電子顕微鏡及び AFM により膜内での色素蛋白複合体の超分子配列の確認を行いながら、極限の空間及び時間分解能を有する時間分解顕微分光計測を実現し、適用することにより、光合成初期過程の実空間・実時間計測を達成することにより、世界にさきがけて、個々の色素蛋白複合体間のエネルギー伝達と位相緩和のメカニズムを解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 人工光合成色素蛋白複合体の創成と構造・機能評価: 紅色光合成細菌の LH1 複合体は、LH1- α および LH1- β ポリペプチド、バクテリオクロフィル 2 量体、カロテノイドより構成される、モノマーサブユニットが会合したリング状の構造を取っている。単離精製した LH1 複合体から有機溶媒を用いてカロテノイド色素を抽出することにより、カロテノイド色素を持たないモノマーサブユニットが調製できる。モノマーサブユニットに任意のポリエチン共役鎖長を持つカロテノイドを再構築し、再会合を行うことにより、人工の LH1 アンテナ色素蛋白複合体を創成する。その構造および光機能評価を分光学的に行う。

(2) 人工光合成膜試料の創成と構造・機能評価: 異種の光合成細菌より調製した LH2 および LH1-RC 複合体を任意比率で卵黄由来のフォスファチジルコリン (Egg PC) 脂質二分子膜に再構築することにより、天然には絶対に存在し得ない LH2 と RC-LH1 の組み合わせを

持つ人工光合成膜試料を創成する。その膜内における色素蛋白複合体の空間配列を透過型電子顕微鏡および AFM を用いて決定する。さらに、LH2 から LH1-RC への励起エネルギー移動に関して分光学的に調査する。

(3) 光合成色素および色素蛋白複合体のコヒーレント分光計測: 我々の研究室で開発した非同軸光パラメトリック増幅器を用いて可視～近赤外波長域におけるサブ 20 フェムト秒レーザーパルスを発生する。このレーザー光源を用いて、有機溶媒中における光合成色素（カロテノイドおよびバクテリオクロフィル）および色素蛋白複合体の縮退 4 光波信号、特に過渡回折信号の検出を行う。得られた実験結果を、ブラウン振動子モデルを用いた時間依存摂動理論を用いて定量的に解析することにより、位相緩和情報も含めた励起エネルギー移動機構の解明に迫る。

(4) 時間分解顕微分光計測システムの構築と光合成試料への応用: 超高速レーザー分光計測装置と光学顕微鏡とを組み合わせることで、色素蛋白複合体の配列様式が確定した 1 枚の光合成膜試料が計測可能な時間分解顕微分光計測装置を開発する。開発した装置を光合成膜試料へ応用することにより、光合成初期過程の真の動作機構解明に迫る。

4. 研究成果

(1) LH1 アンテナ色素蛋白複合体の再構築と Stark 分光測定: 異なる共役鎖長を持つ天然カロテノイドと、LH1 由来のバクテリオクロフィル含有モノマー蛋白サブユニットを用いて、LH1 複合体を再構築した (図 1 参照)。再構成条件の最適化を行うことにより、天然由来の LH1 複合体と極めて近い分光特性を有する再構成 LH1 複合体の調製に成功した。

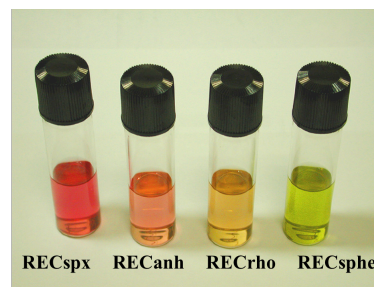


図 1 人工 LH1 複合体溶液の写真。RECspix, RECanh, RECrho, RECsphe は、各々カロテノイドとして、スピリロキサンチン (共役二重結合数 13), アンヒドロロドビリン (12), ロドピン (11), スフェロイデン (10) を再構成したものである。

得られた複合体に対して、Stark 分光測定を適用することにより、カロテノイドおよびバクテリオクロフィル周辺の静電環境を定量した。さらに、分子軌道計算を用いることで、カロテノイド分子が、既に結晶構造解析により構造が報告されている LH2 複合体に結合したカロテノイドと同様のらせん性を持ち LH1 蛋白に結合していることを示唆した。

(2) 人工光合成膜試料の創成と構造・機能評価：Egg PC に LH2, RC-LH1 等の膜蛋白質を様々な割合で再構築する手法を確立した。Egg PC に *Rhodospseudomonas (Rps.) viridis* の RC-LH1 コア複合体を再構築した膜(人工光合成膜)及び *Rps. achidophila* の LH2 アンテナ複合体をも共に再構築した天然にはありえない組み合わせのヘテロな光合成膜蛋白質を持った人工光合成膜の電子顕微鏡観測を行うことに成功し、LH2 アンテナ複合体の RC-LH1 コア複合体に対する量比を増やしていくと伴に膜をフーリエ変換して得られる膜内の繰り返し配列が三角格子から正方格子へと変化することを発見した。フーリエ像の繰り返し距離の解析より、前者は 13.5nm のコア複合体の配列、後者は 8nm の LH2 複合体の配列であることがわかった(図2参照)。また、マイカ基板上に固定した1枚の人工光合成膜の AFM 画像の取得に成功した(図3参照)。

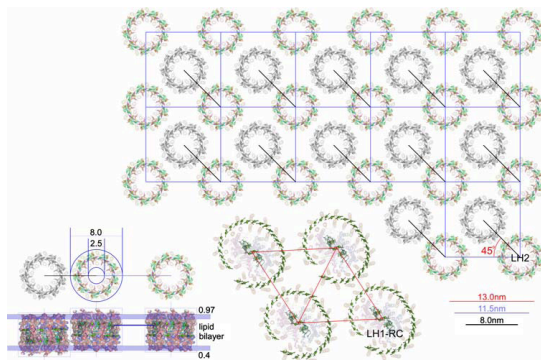


図2 人工光合成膜内におけるアンテナ系色素蛋白複合体の超分子配列を示す模式図。

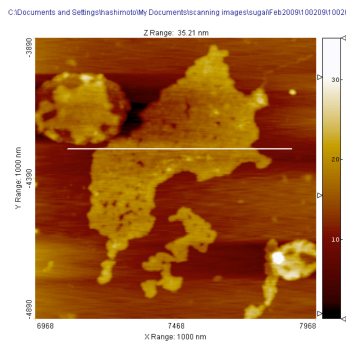


図3 マイカ基板上に固定した1枚の人工光合成膜の AFM 画像。

近赤外にあるコア複合体からの発光を InGaAs 検出器を用いて測定することにより、LH2 アンテナ複合体からコア複合体へのエネルギー伝達が確かに行われること、コアに対する LH2 の量が増加するのに比例してコア1個当たりの蛍光量が増加することを世界で初めて明らかにした。電子顕微鏡観察より得られた配列の情報と、吸収・蛍光・蛍光励起スペクトルの情報より、二次元膜内における LH2 からコア複合体へのエネルギー伝達モデルを作成し、シミュレーションを行った。これらの結果は、空間分解分光測定(顕微分光測定)に供するのに最適な系統的な試料となるとともに、このような解析方法は、時間分解・空間分解分光データの解析手段を確立する第一歩であると考えられる。

(3) 光合成色素および色素蛋白複合体のコヒーレント分光計測：

① カロテノイドは光合成初期過程において、捕まえた光エネルギーを高効率かつ超高速にクロロフィルに受け渡すことにより、光合成反応をスタートさせる、正に光合成反応の最初に位置する重要な色素である。カロテノイドには基底状態 (S_0 状態; 1^1A_g 状態)からの一光子遷移に対して許容な S_2 状態 (1^1B_u 状態)と禁制な S_1 状態 (2^1A_g 状態)の2つの一重項励起状態が存在する。どちらのエネルギー準位を、どの程度の割合使ってクロロフィルにエネルギー伝達するかによって、カロテノイドからクロロフィルへの励起エネルギーの移動効率が決定される。カロテノイドの電子状態を明らかにすると共に、その物性を人為的にコントロールする技術を開発することは、基礎研究、及び応用の両方の観点から非常に興味深い。本研究では、従来あまり注意を払われてこなかった、光合成系における超高速・高効率エネルギー伝達とコヒーレンスとの関係を解明するために、 β -カロテン(共役二重結合数 $n=11$)及び $n=15$ を持つホモログ体(M15-カロテン)の縮退4光波混合実験を行い、3 パルスフォトンエコー信号を観測した。光源には、我々の研究室で開発した、非同軸型光パラメトリック増幅器(自己相関幅 $\Delta t \sim 11$ fs)を用いた。

図4に、 β -カロテンの吸収端近傍で測定したフォトンエコー信号を示す。時間原点付近に現れる強い信号に続き、約 20~30 fs の周期を持つ、複数の成分からなるコヒーレント振動が明瞭に観測された。コヒーレント振動成分のみを取り出したものを挿入図に示した。コヒーレント振動の寿命は、数ピコ秒のオーダーである。また図4には、カロテノイドの緩和過程を表現する適切なモデルを仮定し、インパルス極限において計算を行った結果も示した。実験結果を再現するためには、スペクトル密度関数に、C-CH₃ 変角振動、C-C、C=C 伸縮振動の最低でも 3 つの固有振動モードを取り入れる必要がある。時間原点付近におけるスパイクやそれに続くコヒーレント

振動の様子など、実験と計算との結果は非常に一致を示した。

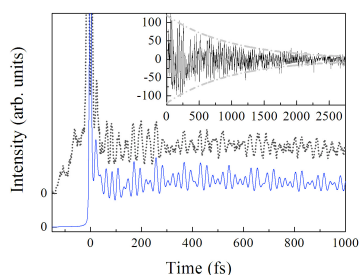


図4 β -カロテンの3パルス光子エコー信号。灰色破線は実験結果を、青色実線はシミュレーションの結果を示している。挿入図はコヒーレント振動成分のみを取り出した結果である。

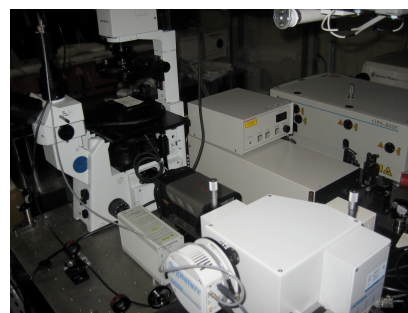
② β -カロテンの共役鎖長が異なる一連の同族体を合成し、非線形光学応答のポリエン型 π 電子共役鎖長依存性を調べた。分光方法としては、サブ20フェムト秒過渡回折縮退四光波混合法を用いた。その結果、基底状態にカップルする分子振動の位相緩和が熱浴からの摂動によって主に引き起こされる事を明らかにし、各分子振動モードの位相緩和寿命を決定した。共役鎖長の短いカロテノイド分子では、C=C二重結合伸縮振動が主なエネルギー散逸のチャンネルとなっているのに対し、共役鎖長の長いカロテノイド分子では、C-C単結合伸縮やC-Me変角振動などの他の振動モードもエネルギー散逸チャンネルとして寄与していることを明らかにした。

③ 光合成色素バクテリオクロフィルのサブ20フェムト秒縮退4光波混合実験を行い、3パルス光子エコー信号を観測した。バクテリオクロフィルの励起状態は、エネルギードナーであるカロテノイドの10倍程度と言う十分に長いコヒーレンスが保たれており、エネルギーの損失が抑えられていることを見出した。また、3パルス光子エコーピークシフト信号の観測を行い、極めて強い逆過渡グレーティング信号を与えることを明らかにした。二準位モデルに2光子過程を取り入れたシミュレーションを行うことで、光子エコーピークシフトの様相を定量的に説明することができるが、強い逆過渡グレーティング信号の存在は如何なるモデルを用いても説明することができず、バクテリオクロフィル分子の電子状態について再考する必要性が示唆された。

④ 光合成による励起エネルギー伝達過程において、伝達に関与する光合成色素と周辺蛋白の相互作用を正しく理解することにより、その失活過程が明らかになる。そのため紅色光合成細菌 *Rba. sphaeroides* 2.4.1 光合成膜, LH2 アンテナ

色素蛋白複合体、および主成分カロテノイドである spheroidene の TG 信号測定を行った。興味深い点として、コヒーレント分子振動の減衰時間が、これら3つの試料でほとんど変わらないことを見出した。このことは、光合成アンテナの励起エネルギー伝達過程において、非常に高効率であることを支持するものである。また、理論モデル計算を行ったところ、実験結果をよく再現することも分かった。

(4) 時間分解顕微分光計測システムの構築と光合成試料への応用：世界最高水準の時間分解計測装置と光学顕微鏡とを組み合わせることで、実空間・実時間分光解析を達成するための装置開発を行った。研究期間内にプロトタイプを制作するに留まったが、今後、装置性能を最適化し、世界ナンバーワンかつオンリーワン技術の確立を達成して行く予定である。完成したプロトタイプ装置のスナップ写真を以下に示す。



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 70 件)

- ① M. Sugisaki, M. Fujiwara, S.V. Nair, H.E. Ruda, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, "Spectrally-resolved transient grating signals from β -carotene in benzene solution", *Phys. Stat. Solidi (c)* (2009) in press. 査読有
- ② M. Sugisaki, M. Fujiwara, R. Fujii, K. Nakagawa, M. Nango, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, "Transient grating spectroscopy in photosynthetic purple bacteria *Rhodobacter sphaeroides* 2.4.1", *J. Lumin.* (2009) in press. 査読有
- ③ M. Fujiwara, M. Sugisaki, A. Gall, B. Robert, R. J. Cogdell, and H. Hashimoto, "Ultrafast optical responses of β -carotene and lycopene probed by sub-20 fs time-resolved coherent spectroscopy", *J. Lumin.* (2009) in press. 査読有
- ④ N. Chartterjee, D.M. Niedzwiedzki, K. Aoki, T. Kajikawa, S. Katsumura, H. Hashimoto, and H.A. Frank, "Effect of structural modifications on the spectroscopic

- properties and dynamics of the excited states of peridinin”, *Arch. Biochem. Biophys.* **483** (2009) 146-155. 査読有
- ⑤ M. Fujiwara, K. Yamauchi, M. Sugisaki, K. Yanagi, A. Gall, B. Robert, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, “Large Third-Order Optical Nonlinearity Realized in Symmetric Nonpolar Carotenoids”, *Phys. Rev. B* **78**, 161101(R) (2008). 査読有
- ⑥ M. Fujiwara, K. Yamauchi, M. Sugisaki, A. Gall, B. Robert, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, “Energy dissipation in the ground-state vibrational manifolds of β -carotene homologues: A sub-20-fs time-resolved transient grating spectroscopic study”, *Phys. Rev. B* **77**, 205118 (2008). 査読有
- ⑦ K. Nakagawa, S. Suzuki, R. Fujii, A. T. Gardiner, R. J. Cogdell, M. Nango, H. Hashimoto, “Probing the Effect of the Binding Site on the Electrostatic Behavior of a Series of Carotenoids Reconstituted into the Light-Harvesting 1 Complex from Purple Photosynthetic Bacterium *Rhodospirillum rubrum* Detected by Stark Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. B* **112** (2008) 9467-9475. 査読有
- ⑧ R. Fujii, S. Shimonaka, N. Uchida, A.T. Gardiner, R.J. Cogdell, M. Sugisaki, and H. Hashimoto, “Construction of hybrid photosynthetic units using peripheral and core antennae from two different species of photosynthetic bacteria: Detection of the energy transfer from bacteriochlorophyll *a* in LH2 to bacteriochlorophyll *b* in LH1”, *Photosynth. Res.* **95** (2008) 327-337. 査読有
- ⑨ M. Sugisaki, R. Fujii, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, “Linear and nonlinear optical responses in bacteriochlorophyll *a*”, *Photosynth. Res.* **95** (2008) 309-316. 査読有
- ⑩ M. Sugisaki, K. Yanagi, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, “Unified explanation for linear and nonlinear optical responses in β -carotene: A sub-20 fs degenerate four-wave mixing spectroscopic study”, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 155110/1-11. 査読有
- ⑪ R.L. Christensen, M.G.I. Galinato, E.F. Chu, R. Fujii, H. Hashimoto, and H.A. Frank, “Symmetry Control of Radiative Decay in Linear Polyenes: Low Barriers for Isomerization in the S_1 State of Hexadecaheptaene”, *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 1769-1775. 査読有
- ⑫ T. Buckup, J. Savolainen, W. Wohlleben, J.L. Herek, H. Hashimoto, R.R.B. Correia, and M. Motzkus, “Pump-probe and pump-deplete-probe spectroscopy on carotenoids with $N = 9-15$ conjugated bonds”, *J. Chem. Phys.* **125** (2006) 194505/1-194505/7. 査読有
- ⑬ D. Kosumi, K. Yanagi, R. Fujii, H. Hashimoto, and M. Yoshizawa, “Conjugation length dependence of relaxation kinetics in β -carotene homologs probed by femtosecond Kerr-gate fluorescence spectroscopy”, *Chem. Phys. Lett.* **425** (2006) 66-70. 査読有
- ⑭ H. Hashimoto, R. Fujii, K. Yanagi, T. Kusumoto, A.T. Gardiner, A.W. Roszal, N.W. Issacs, Z. Pendon, D. Niedzwiedski, H.A. Frank, and R.J. Cogdell, “Structures and functions of carotenoids bound to reaction centres from purple photosynthetic bacteria”, *Pure Appl. Chem.* **78** (2006) 1505-1518. 査読有
- ⑮ D. Polli, G. Cerullo, G. Lanzani, S. De Silvestri, H. Hashimoto, and R.J. Cogdell, “Carotenoid-Bacteriochlorophyll Energy Transfer in LH2 Complexes Studied with 10-fs Time Resolution”, *Biophys. J.* **90** (2006) 2486-2497. 査読有
- ⑯ D. Kozumi, M. Komukai, H. Hashimoto, and M. Yoshizawa, “Ultrafast Dynamics of All-*trans*- β -Carotene Explored by Resonant and Nonresonant Photoexcitations”, *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 213601. 査読有
- ⑰ R. Fujii, T. Kusumoto, T. Sashima, R.J. Cogdell, A.T. Gardiner and H. Hashimoto, “Sub- μ -second time-resolved absorption spectroscopy of a polar carotenoid analogue, 2-(all-*trans*-retinylidene)-indan-1,3-dione; formation of the dication by direct triplet-excited sensitization”, *J. Phys. Chem. A* **109** (2005) 11117-11122. 査読有
- ⑱ D. Kosumi, K. Yanagi, T. Nishio, H. Hashimoto, and M. Yoshizawa, “Excitation energy dependence of excited states dynamics in all-*trans*-carotenes determined by femtosecond absorption and fluorescence spectroscopy”, *Chem. Phys. Lett.* **408** (2005) 89-95. 査読有
- ⑲ K. Yanagi, M. Shimizu, H. Hashimoto, A.T. Gardiner, A.W. Roszak, and R.J. Cogdell, “Local Electrostatic Field Induced by the Carotenoid Bound to the Reaction Center of the Purple Photosynthetic Bacterium *Rhodobacter sphaeroides*”, *J. Phys. Chem. B* **109** (2005) 992-998. 査読有
- ⑳ K. Yanagi, A.T. Gardiner, R.J. Cogdell, and H. Hashimoto, “Electroabsorption spectroscopy of β -carotene homologs: anomalous enhancement of $\Delta\mu$ ”, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 195118. 査読有

他 50 件

[学会発表] (計 258 件)

- ① H. Hashimoto, “Solar to Fuels; Natural Tactics of Solar Energy Conversion by Photosynthesis”, 15th International SPACC Symposium, Osaka, Japan, 20th November 2008 (SPACC 賞受賞記念基調講演) .
- ② H. Hashimoto, M. Sugisaki, M. Fujiwara, and R.J. Cogdell, “Sub-20-fs Coherent Spectroscopy of Carotenoids”, ESF Workshop “Novel Methods in Exploring Carotenoid Excited State Dynamics”, Nove Hrad, Czech Republic, 2008.9.21-25 (Invited Lecture).
- ③ H. Hashimoto and R.J. Cogdell, “Current Understanding of the Photophysics of Carotenoids”, The 15th International Symposium on Carotenoids, Hotel Moon Beach, Okinawa, Japan, 2008.6.22-27 (Plenary Lecture).
- ④ H. Hashimoto, M. Sugisaki, and R.J. Cogdell, International Conference on Light-Harvesting Processes, 21-24 March, 2007, Banz Monastery, German “Very early photophysics of carotenoids probed by sub-20 fs degenerated four-wave mixing (DFWM) spectroscopy” (Invited Lecture).
- ⑤ H. Hashimoto, M. Sugisaki, A.T. Gardiner, and R.J. Cogdell, 7th Gordon Research Conference on Carotenoids, 7-12 January, 2007, Ventura, California, USA “Very early photophysics of carotenoids probed by sub-20 fs degenerated four-wave mixing (DFWM) spectroscopy” (Invited Lecture).
- ⑥ H. Hashimoto, R. Fujii, K. Yanagi, A.T. Gardiner, A.W. Roszak, N.W. Isaacs, H.A. Frank and R.J. Cogdell, 14th International Symposium on Carotenoids, 17-22 July (2005) Edinburgh, Scotland, UK. “Structures and Functions of Carotenoids Bound to Reaction Centres from Purple Photosynthetic Bacteria” (Invited Lecture).

他 252 件

[図書] (計 5 件)

- ① R.J. Cogdell, A.T. Gardiner, M. Gabrielsen, J. Southall, A.W. Roszak, N.W. Isaacs, R. Fujii and H. Hashimoto, “The Structure of Purple Bacterial Antenna Complexes”, In: Petra Fromme (Ed.), *Photosynthetic Protein Complexes A Structural Approach*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2008), pp. 325-340.

- ② 高橋 宏典, 橋本 秀樹, “テラヘルツ技術要覧”, テラヘルツテクノロジーフォーラム編, NGT (2007) pp. 123-125. “第3章 テラヘルツ光源, 3.1 超短パルステラヘルツ光源, 3.1.3 非線形光学結晶からのテラヘルツ発生, 3.1.3.2 有機非線形結晶, (2) 有機非線形結晶BNA”
- ③ 橋本 秀樹, “光技術の最先端を探る”, (独) 科学技術振興機構 編, アドスリー, 丸善 (2007) pp. 79-109. “光合成をこの手に!”
- ④ 橋本 秀樹, 藤井 律子, 杉崎 満, “光物性の基礎と応用”, 光物性研究会組織委員会編, オプトロニクス社 (2006) pp. 239-261. “第5章 有機・バイオ — 光合成アンテナ色素蛋白複合体・カロテノイド・超高速レーザー分光 —”
- ⑤ 橋本 秀樹, 藤井 律子, “光合成微生物の機能と応用”, 上原 赫 監修, シーエムシー出版 (2006) pp. 18-37. “第1章 光合成の基礎 2 光合成の初期過程の最新の描像”

[その他]

ホームページ

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/PBM/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 秀樹 (HASHIMOTO HIDEKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 50222211

(2) 研究分担者

杉崎 満 (SUGISAKI MITSURU)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 20360042

藤井 律子 (FUJII RITSUKO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・博士研究員
研究者番号: 80351740

(3) 連携研究者

南後 守 (NANGO MAMORU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90109893

鈴木 正人 (SUZUKI MASATO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号: 70254381