

令和元年5月31日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04102

研究課題名(和文)電子と水素結合の連動ダイナミクスを可視化するアト秒化学研究をめざした実験的試み

研究課題名(英文) Ultrafast spectroscopic study for visualizing the coupling between electronic excitation and hydrogen-bond dynamics

研究代表者

竹内 佐年 (Takeuchi, Satoshi)

兵庫県立大学・物質理学研究科・教授

研究者番号：50280582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：紅色光合成細菌で光センサーとして働く光受容タンパク質において重要な役割を果たす水素結合変化が起こる仕組みを解明するため、極短パルス光源を用いたフェムト秒広帯域時間領域ラマン分光を高度化し、その初期過程を観測・可視化した。その結果、光を吸収する部位とそれに隣接する水素結合網の核の動きに強い結合(運動性)が確認された。これにより、光受容タンパク質における光吸収を起点とする「信号伝達のはじまり」の分子機構とその時間スケールを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体の中で起こる現象を分子レベルで観測することは、生命活動に対する深い理解につながる。このような観点から本研究では、光受容タンパク質の中の様々な部位の原子の動きを観測し、それらの動きどうしの相関を可視化することのできる新たな実験手法の開発に成功した。この成果は今後、生体内での連動した原子・分子の動きがいかんして生体信号を伝え、生命機能を発現および維持させているかという根源的な問いを解明していく手がかりのひとつになると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We studied the initial nuclear dynamics in a bacterial photoreceptor protein by ultrafast time-domain Raman spectroscopy. Newly developed high-order nonlinear Raman scheme enabled us to observe a distinct anharmonic coupling between the chromophore vibration and the hydrogen-bond motion surrounding the chromophore. The obtained result revealed the molecular mechanism of signal transduction in the primary photoreception process.

研究分野：分子分光学

キーワード：超高速分光 ラマン分光 核運動 非調和結合 光受容蛋白質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素結合は重要な化学結合の1つであり、水の特異な物性や蛋白質の天然構造形成などにおいて中心的な役割を果たしている。特に、結合に関与する水素原子(プロトン)の移動は結合強度の変化や分子の互変異性化をもたらすため、合成化学のみならず、物質科学、蛋白質科学などの広範な分野で重要であり、これまで赤外吸収、ラマン、X線回折などによる様々な研究が行われてきた。しかし、水素は最も軽い元素で量子性が高いため、水素結合ダイナミクスを実時間で捉えることは先端的な方法を用いてもなお容易ではない。実際、分子内の光誘起プロトン移動の多くは数十フェムト秒以内に起こり、実験的に不明な点が多い。また光受容蛋白質の初期過程の水素結合変化では、数ピコ秒以内という時間スケールがようやく示された段階に過ぎない。つまり、分子の光吸収がいかにして水素結合変化につながるのか、未解明な点が多いと言える。数十フェムト秒領域では、電子コヒーレンスの存在のもと水素結合変化が進んでいる可能性もある。従って、光励起分子の電子状態の振舞い、電子コヒーレンスの減衰、水素結合強度の変化を観測し、比較し、そして電子と水素の「連動性」を解明することは、光が水素結合変化を引き起こす仕組みを理解するうえで重要である。特に光受容蛋白質においてこの知見は、発色団による光吸収を、水素結合の変化を通して高次構造変化へと変えていくこと、つまり「信号伝達のはじまり」の理解につながるものであり、蛋白質科学における意義は大きい。

研究開始の当初、我々は10フェムト秒級のパルス光を用いた独自の時間領域分光の開発により、それまで困難であったフェムト秒領域でのラマン測定を可能とし、スチルベン分子の光異性化に伴う連続的な構造変化の追跡に成功していた。また、紅色光合成細菌の負の走光性(光から遠ざかる性質)をつかさどるイエロープロテインのフェムト秒構造ダイナミクスを調べ、発色団と隣接アミノ酸との間の水素結合強度を反映するラマン指標が光吸収後100フェムト以内に減衰するという結論を得ていた。この結果は、光受容初期過程で水素結合の変化が重要な役割を果たしていることを示唆するが、同時に、発色団分子の電子状態変化との連動性など、本質的理解にはいまだ至っていないことを浮き彫りにした。

そこで、我々が培ってきた先端分光技術と独自に開発する方法論をさらに高度化して適用することにより、光励起された発色団分子の電子状態や構造の変化と周辺の水素結合網の変化との連動性、協調性を明らかにすることができるのではないかと考えた。またこれは、光受容蛋白質の動作機序の理解に向けた新たな展開をもたらすと期待された。

2. 研究の目的

本研究では、光受容蛋白質の初期過程で重要な役割を果たす光誘起水素結合変化に着目し、その分子過程を観測し、可視化し、解明することを目標とする。特に、独自に開発を続けてきた極短パルス光源を用いたフェムト秒広帯域時間領域ラマン分光を極限まで高度化し、さらに高次非線形ラマン分光(二次元ラマン分光)の方法論と実験スキームを開発し、それを光受容蛋白質に適用する。この先端的な分光実験により、発色団分子の光吸収による電子状態変化と周辺の水素結合網の変化との連動性、協調性、およびその時間スケールを明らかにするとともに、発色団分子およびその周辺の核変位どうしの相関(非調和性)を解明する。これにより、タンパク質が機能を発現し始める精巧な分子メカニズムと動作機序を分子科学に立脚して深く理解する。

3. 研究の方法

本研究では、複数の極短パルス光を用いたフェムト秒広帯域時間領域ラマン分光(TR-ISRS)のための分光装置を開発、高度化するとともに、二次元ラマン分光の新たな実験スキームを開発することにより、フェムト秒構造化学研究と振動構造における相関解析を推進した。

TR-ISRS分光による研究では、チタンサファイア再生増幅器の出力光(800 nm, 80 fs, 1 mJ, 1 kHz)を光源として用いて2つの非同軸パラメトリック増幅器(NOPA)を励起し、独立に波長可変の2つパルス光を発生させた。一方のNOPA出力を中心波長450 nmに調整し、その群遅延分散をプリズム対により補正した。さらに、回折格子とスリットを用いた4f光学系によりそのスペクトル幅を調整し、パルス幅が35 fsまたは75 fsとなるように設定した。この青色極短パルス光を励起光(P1)として用い、タンパク質試料の光励起をおこなった。

他方のNOPA出力は波長域500~680 nmの広帯域光となるように調整し、前置プリズム対を用いてそのパルス幅を15 fs程度まで圧縮した。それに続き、この広帯域光を回折格子、凹面鏡、可変形鏡から構成される4f光学系に導入し、その群遅延分散を高次項まで補償した。試料位置におけるパルスの位相構造を自己回折方式の周波数分解光ゲート測定により評価した。この評価信号をフィードバックし、いわゆる遺伝アルゴリズムを用いたプログラムにより可変形鏡の形状を最適化した。この方法により可視領域での原理限界に近い6 fsへのパルス圧縮を実現した。このフーリエ変換限界の極短パルスを2つにわけ、それぞれTR-ISRS分光のためのラマン励起光(P2)およびプローブ光(P3)として用いた。P1-P2およびP2-P3間の遅延時間をモーター駆動ステージおよびピエゾ駆動ステージで調整したのち、これら3つのパルス光を試料のフォーセルに集光した。試料を透過したP3光の強度をフォトダイオードで検出し、P2光のON/OFFによる変化分からTR-ISRS信号を求めた。

4. 研究成果

(1) PYPの初期構造ダイナミクス

光吸収を起点として機能を発現する光受容タンパク質は時間分解分光によるダイナミクスの研究に適していることから、構造と機能発現の連関に関する研究の格好の対象といえる。その中でもイエロープロテイン (Photoactive Yellow Protein; PYP) は紅色光合成細菌 (Halorhodospira halophila) が有する光受容タンパク質であり、その負の走光性にかかわる青色光センサーの役割を担っていると考えられている。このタンパク質では、Cys69 残基に繋がれた発色団分子 (trans-p-クマル酸) が青色光を吸収して trans-cis 異性化を起こし、それが、いくつかの中間体を含む光サイクル反応を通してタンパク質全体の構造変化を引き起こし、機能発現に繋がると理解されてきた。しかし、発色団による光吸収の直後に現れる励起状態 (pG^*) が観測されるフェムト〜ピコ秒時間領域での構造ダイナミクスに関する知見が限られていたため、我々は TR-ISRS 分光による PYP の光反応初期構造ダイナミクスの研究を続けてきた。

高次非線形ラマン分光による研究に先立ち、まず PYP 励起状態の振動構造の観測と確認をおこなった。この実験では、励起光による振動コヒーレンスの誘起を避け、励起状態の純粋な分布数ダイナミクスおよび振動構造を観測するため、約 300 fs までパルス幅を伸ばした (狭帯域化した) 励起光で PYP (緩衝溶液中、pH7) を光励起した。様々な遅延時刻 (ΔT) にラマン励起光を照射し、それにより誘起された励起状態のコヒーレントな核運動をプローブ光の吸収の変化として時間領域で観測した。この時間領域で観測された信号 (振動成分) をフーリエ変換することで各遅延時刻におけるラマンスペクトルを得た。観測されたラマンスペクトルは、二色ポンプ・プローブ分光を用いて以前に測定したフランク・コンドン状態の振動スペクトルと同じ振動数パターンを示し、かつ、PYP 励起状態の寿命 (約 2.4 ps) で減衰することから、励起状態 (pG^*) のラマンスペクトルに帰属することができた。得られたラマンスペクトルには 1160、751、538、310、135 cm^{-1} に主要なバンドが観測され、これらの振動数やスペクトル全体としての強度パターンは励起状態寿命の間に大きな変化は見られなかった。この結果は、PYP 発色団分子が励起状態の寿命の間、元のトランス型の分子構造を保持していることを示唆している。

(2) 二次元ラマン分光スキームの開発と実現

PYP 励起状態での振動モード間の非調和結合を調べるための二次元ラマン分光を実現するために、PYP の電子状態にあわせた実験条件の最適化をおこなった。励起光の波長は S_1 S_0 遷移に共鳴する 450 nm とし、これによって励起状態 (pG^*) の分布数だけでなく振動コヒーレンスも誘起するために、励起光のパルス幅を 35 fs とした。このパルス幅はこれまでの PYP の構造ダイナミクス研究に使われてきたもの (約 300 fs) に比べて十分に短いため、励起分子の生成とともに励起状態に約 1000 cm^{-1} までのラマン活性な振動をコヒーレントに引き起こすことができる。実際、励起光とプローブ光 (6 fs) のみを使ったポンプ・プローブ分光により、励起状態に由来する誘導放出信号の時間プロフィールには励起状態のコヒーレントな振動によるビート成分が明瞭に観測された。このビート成分のフーリエ解析により、751、538、310、135、50 cm^{-1} などのバンドがみられた。これらのバンドは励起光によって誘起された S_1 状態のラマン活性な振動モードに対応する。

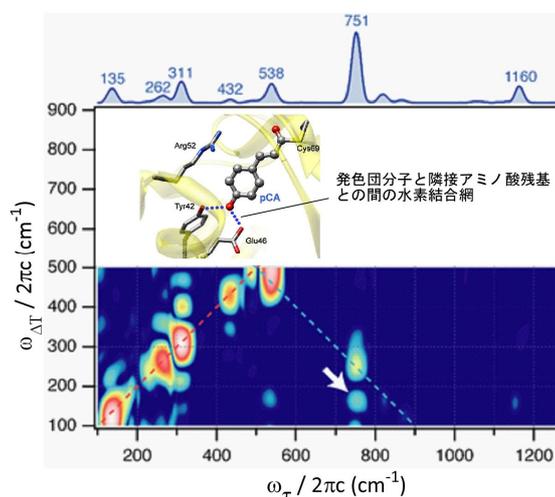
二次元ラマン分光では、励起光によって $\Delta T=0$ に誘起された振動コヒーレンスの自由誘導減衰がまだ続いている間に、極短ラマン励起光を時刻 ΔT に照射する。このラマン励起光の波長を、 S_0 状態の吸収帯とは重ならないが S_1 状態の誘導放出帯には重なるように調整すると、 $S_1 - S_0$ 誘導放出遷移を使ったインパルス誘導ラマン過程により、 S_1 状態に新たなコヒーレント振動を引き起こすことができる。これらのコヒーレントな振動は、ラマン励起光とプローブ光との遅延時間 () を掃引することで、プローブ光の吸収信号に含まれる振動成分として観測される。このように $\Delta T=0$ に励起光によって誘起されるコヒーレント振動と $\Delta T \neq 0$ にラマン励起光によって誘起されるコヒーレント振動が干渉可能な条件下で観測される分光信号は、全体として 5 次の非線形光学過程によるものと捉えることができ、2 つの異なるパルスによって励起された同一電子状態 (S_1 状態) の振動モード間の (非調和) 結合に関する情報を含んでいる。

これまでも、このような 2 回のラマン励起過程とプローブ過程からなる高次ラマン分光により、振動モード間の非調和結合に関する研究は主に基底状態分子を対象として行われてきた。しかし、同一波長を用いた実験では、前半の光学過程で生じる 3 次非線形分極からの光電場が後半の 3 次非線形光学過程にも使われ、その結果みかけ上、5 次の非線形分極より生じる本来の信号と同様のものが観測されてしまう場合が多くあった。つまり、これまでの実験では 3 次非線形光学過程のカスケード成分が信号に混入することが多く、純粋な 5 次非線形分極に由来する信号の観測は困難とされていた。

これに対し本研究では、 S_1 状態での振動を 2 つの異なる光学遷移 ($S_1 - S_0$ 吸収過程と $S_1 - S_0$ 誘導放出に共鳴するインパルス誘導ラマン過程) でコヒーレントに励起することにより、3 次非線形光学過程のカスケードによるアーティファクトを実効的に抑え、純粋な 5 次の非線形光学過程に由来する分光信号を観測することに成功した。これは 2 次元ラマン分光分野における実験上の長年の問題を解決したとして高く評価され、本研究の成果は Science Advances 誌に掲載されることになった。

(3) PYP 励起状態における振動非調和結合

PYP の二次元ラマン分光ではまず、ラマン励起光によって誘起された TR-ISRS 信号に含まれる振動成分をフーリエ解析することにより、光励起からの時刻 ΔT での S_1 状態のラマンスペクトルを得た。この観測されたラマンバンドの振幅は振動しながら減衰していく振舞いをみせた。これは励起光によって誘起された振動コヒーレンスとラマン励起光によって誘起された振動コヒーレンスの間の一種の干渉によるものであり、観測された振動的振舞いが5次非線形光学過程によるものであることを示唆する。そこで、この時間的変調の中に含まれる振動モード間の非調和結合に関する情報を引き出すために、ラマンスペクトルデータの一式を ΔT についてフーリエ解析し、変調周波数を求めた。この



解析により、右図に示すとおり二次元振動数相関マップを得ることができた。この図において縦軸は励起光によって誘起されたコヒーレント振動の振動数、横軸はラマン励起光によって誘起されたコヒーレント振動の振動数を表し、二次元マップ中の各ローブの強度は対応する2つの周波数成分間の相関の強さを表す。図に見られるようにローブの多くは対角線上に現れており、これらはその振動モードのラマン強度が自分自身の振動数で変調していることを意味する。この現象は、励起光によって誘起された振動コヒーレンスがラマン励起光との相互作用によって分布数状態に移動すること、すなわち coherence transfer に対応する。この対角線上のローブ信号も5次非線形光学過程によるものではあるが、振動モード間の相関を表すものではない。しかし図の二次元相関マップをよくみると、751 cm^{-1} と約160 cm^{-1} の振動数成分に対応する交差ピークが観測されていることがわかる。つまり、751 cm^{-1} の振動モードのラマン強度が約160 cm^{-1} 振動の周期で変調されており、このことは両者が非調和結合していることを端的に示している。

PYP 励起状態で観測された751 cm^{-1} モードは発色団のフェノール部位のC-O伸縮振動によるものである。一方、二次元マップで観測された交差ピークに対応する約160 cm^{-1} の振動数は S_1 状態の135 cm^{-1} および189 cm^{-1} のモードの寄与を含むと考えられる。これら2つの低波数モードの核変位の正確な表現や帰属は簡単ではないが、野生種および変異体に対する共鳴ラマン分光の結果より、これらのモードは発色団分子と直接的に水素結合している隣接アミノ酸残基(42位のチロシンと46位のグルタミン酸)と発色団分子との間の相対的な運動を多く含む分子間振動に対応すると考えられている。したがって、観測された二次元マップは発色団分子のC-O伸縮運動とこの分子間振動が非調和結合していることを意味する。実際、PYP 発色団分子はフェノールのC-O部位で隣接するチロシン、グルタミン酸と水素結合をつくり、発色団分子周辺の水素結合網を形成しているため、両者の動きに連動性が期待される。言い換えれば、C-O伸縮振動座標に沿ったポテンシャル局面は、この分子間振動運動との非調和結合を通して歪んでおり、それが二次元振動数相関マップにおける交差ピークとして観測されたと理解することができる。このように、本研究で開発された5次非線形分光過程にもとづく二次元ラマン振動数マップ法は、タンパク質のような多次元、多自由度をもつ複雑系においても、互いに相関しあった核運動どうしの連動性を可視化することのできる優れた分光手法であるといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

- (1) 倉持光、藤澤知績、竹内佐年、田原太平、「フェムト秒時間領域ラマン分光法を用いた光受容・発光タンパク質の反応ダイナミクスの研究」、生物物理、査読有、59(1)、26-29(2019). DOI: 10.2142/biophys.59.026
- (2) M. Iwamura, K. Kimoto, K. Nozaki, H. Kuramochi, S. Takeuchi, T. Tahara, "Metal-metal bond formations in $[\text{Au}(\text{CN})_2]_n$ ($n = 3, 4, 5$) oligomers in water identified by coherent nuclear wavepacket motions", Journal of Physical Chemistry Letters, 査読有, 9, 7085 - 7089 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpcllett.8b03139
- (3) K. Inoue, S. Tahara, Y. Kato, S. Takeuchi, T. Tahara, H. Kandori, "Spectroscopic study of proton transfer mechanism of inward proton pump rhodopsin, Parvularcula oceani xenorhodopsin", Journal of Physical Chemistry B, 査読有, 122, 6453 - 6461 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpccb.8b01279
- (4) S. Tahara, S. Takeuchi, R. Abe-Yoshizumi, K. Inoue, H. Ohtani, H. Kandori, T. Tahara, "Origin of the reactive and non-reactive excited States in the primary reaction of rhodopsins: pH dependence of femtosecond absorption of light-driven sodium ion pump rhodopsin KR2", Journal of Physical Chemistry B, 査読有, 122, 4784 - 4792 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpccb.8b01934
- (5) H. Kuramochi, S. Takeuchi, T. Tahara, "Ultrafast photodissociation dynamics of

- diphenylcyclopropanone studied by time-resolved impulsive stimulated Raman spectroscopy", *Chemical Physics*, 査読有, 512, 88 - 92 (2018). DOI: 10.1016/j.chemphys.2018.02.023
- (6) W. Piao, K. Hanaoka, T. Fujisawa, S. Takeuchi, T. Komatsu, T. Ueno, T. Terai, T. Tahara, T. Nagano, Y. Urano, "Development of an azo-based photosensitizer activated under mild hypoxia for photodynamic therapy", *Journal of American Chemical Society*, 査読有, 139, 13713 - 13719 (2017). DOI: 10.1021/jacs.7b05019
- (7) H. Kuramochi, T. Fujisawa, S. Takeuchi, T. Tahara, "Broadband Stimulated Raman Spectroscopy in the Deep Ultraviolet Region", *Chemical Physics Letters*, 査読有, 683, 543 - 546 (2017). DOI: 10.1016/j.cplett.2017.02.015
- (8) N. Shin, K. Hanaoka, W. Piao, T. Miyakawa, T. Fujisawa, S. Takeuchi, S. Takahashi, T. Komatsu, T. Ueno, T. Terai, T. Tahara, M. Tanokura, T. Nagano, Y. Urano, "Development of an Azoreductase-based Reporter System with Synthetic Fluorogenic Substrates", *ACS Chemical Biology*, 査読有, 12, 558 - 563 (2017). DOI: 10.1021/acscchembio.6b00852
- (9) H. Kuramochi, S. Takeuchi, K. Yonezawa, H. Kamikubo, M. Kataoka, T. Tahara, "Probing the early stages of photoreception in photoactive yellow protein with ultrafast time-domain Raman spectroscopy", *Nature Chemistry*, 査読有, 9, 660 - 666 (2017). DOI: 10.1038/nchem.2717
- (10) M. M. Sartin, K. Kondo, M. Yoshizawa, S. Takeuchi, T. Tahara, "Local environment inside a novel aromatic micelle investigated by steady-state and femtosecond fluorescence spectroscopy of an encapsulated solvatochromic probe", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 査読有, 19, 757 - 765 (2017). DOI: 10.1039/C6CP06174E
- (11) 竹内佐年, 「発光タンパク質に振動コヒーレンスは寄与しているのか?」, *ディビジョン・トピックス*, 「化学と工業」, 査読有, 70 (3), 250 (2017).
- (12) Y. Harabuchi, R. Yamamoto, S. Maeda, S. Takeuchi, T. Tahara, T. Taketsugu, "Ab initio molecular dynamics study on photoreaction of 1,1'-dimethylstilbene upon $S_0 \rightarrow S_1$ excitation", *Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, 120, 8804 - 8812 (2016). DOI: 10.1021/acs.jpca.6b07548
- (13) H. Kuramochi, S. Takeuchi, T. Tahara, "Femtosecond time-resolved impulsive stimulated Raman spectroscopy using sub-7-fs pulses: Apparatus and applications", *Review of Scientific Instruments*, 査読有, 87, 043107 (10 page) (2016). DOI: 10.1063/1.4945259

〔学会発表〕(計 63 件、うち招待講演 15 件について記載)

- (1) 竹内佐年, 「分子の構造ダイナミクス追跡とその極限化」, 日本分光学会中国四国支部講演会、広島大学(広島)、2019年3月25日(招待講演)
- (2) 竹内佐年, 「反応分子の超高速構造ダイナミクス追跡」, 強光子場科学研究懇談会、理化学研究所放射光センター(播磨)、2019年1月18日(招待講演)
- (3) S. Takeuchi, "Ultrafast time-domain Raman study of bond strengthening in oligomers of Au(I) complex", India-Japan Mini-Workshop: Frontiers in Molecular Spectroscopy, Kobe University (Japan), October 30 - November 2, 2018. (招待講演)
- (4) S. Takeuchi, "Ultrafast time-domain Raman approach to probe initial events in photoreception", 5th Ultrafast Dynamic Imaging of Matter (UFDIM), Crete (Greece), September 28 - October 4, 2018. (招待講演)
- (5) 竹内佐年, 「極短パルス光で探る分子の形と動きと反応」, 多重極限物質科学研究センターセミナー、兵庫県立大学、赤穂郡、2018年6月27日(招待講演)
- (6) 竹内佐年, 「超高速時間領域ラマン分光法を用いた光受容初期過程の解明」, 兵庫県立大学細胞制御 講座セミナー、兵庫県立大学、赤穂郡、2018年6月18日(招待講演)
- (7) 竹内佐年, 「超高速時間領域ラマン分光法を用いた反応分子の構造追跡」, 平成30年度日本分光学会年次講演会シンポジウム、慶応大学、横浜市、2018年5月22-25日(招待講演)
- (8) S. Takeuchi, "Ultrafast time-domain Raman probing of tight bond formation in oligomers of Au(I) complex", 21st East Asian Workshop on Chemical Dynamics, Kyoto (Japan), December 18 - 21, 2017. (招待講演)
- (9) 竹内佐年、倉持光、岩村宗高、野崎浩一、田原太平, 「超高速時間領域ラマン分光による金原子間結合生成過程の実時間追跡」, 理研シンポジウム 第5回「光量子工学研究」, 仙台市、2017年11月29-30日(招待講演)
- (10) S. Takeuchi, H. Kuramochi, M. Iwamura, K. Nozaki, T. Tahara, "Ultrafast time-domain Raman study of bond strengthening in oligomers of Au(I) complex", International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy, Churchill College, Cambridge (UK), July 16 - 21, 2017. (招待講演)

- (11) 竹内佐年、「超高速分光を可能にする様々なレーザー光源と光技術」、独創的研究提案課題「物質階層の原理を探究する統合的実験研究」ExpRes 道場“レーザー”、理化学研究所、和光、埼玉、2017年6月16日（招待講演）
- (12) 竹内佐年、「反応分子の超高速構造ダイナミクス追跡」、京都大学大学院理学研究科化学専攻 研究セミナー、京都大学、京都、2016年11月30日（招待講演）
- (13) S. Takeuchi, “Ultimate time-domain Raman approach to reveal ultrafast nuclear motions in photo-responsive proteins”, EMN Meeting on Ultrafast 2016, Melbourne (Australia), October 10 – 14, 2016.（招待講演）
- (14) 竹内佐年、「反応分子の超高速構造ダイナミクス追跡」、第3回森野ディスカッション、東京大学、文京区、東京、2016年8月31日（招待講演）
- (15) S. Takeuchi, “Primary dynamics of photo-responsive proteins probed by femtosecond absorption and Raman spectroscopy”, 26th IUPAC International Symposium on Photochemistry, Osaka (Japan), April 3 – 8, 2016.（招待講演）

〔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

<http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/edu/kenkyuu/base14.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし