

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 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22245005

研究課題名（和文） 遷移状態近傍分子に迫る新規フェムト秒構造ダイナミクス研究

研究課題名（英文） Femtosecond vibrational study for exploring the transition-state structure

研究代表者

竹内 佐年 (TAKEUCHI SATOSHI)

独立行政法人理化学研究所・田原分子分光研究室・専任研究員

研究者番号：50280582

研究成果の概要（和文）：

超高速反応で最も重要な役割を果たすポテンシャル近接領域近傍の分子のダイナミクスを赤外光を用いたポンプ-ダンプ-プローブ分光により研究し、ダンプ波長の増加とともにダンプ効率の立ち上がり時間が遅れるという形で、反応座標に沿う分子の構造発展を追跡することに成功した。また、新規開発した波長可変光源を用いて紫外共鳴フェムト秒ラマン測定を初めて実現し、それにより光受容蛋白質（PYP）の発色団分子の構造ダイナミクスを研究し、この分子が光励起後 1 ps 以内に面内変形を起こすことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Using pump-dump-probe spectroscopy, we studied the dynamics of reacting molecules near the conical intersection region that plays crucial roles in ultrafast reactions. The data clearly showed that the dump efficiency rises up more slowly for dumping with longer wavelengths, revealing the wavepacket migration toward the conical intersection region along the reaction coordinate. We also realized uv-resonance femtosecond stimulated Raman spectroscopy with tunable uv pulses, and using this, we revealed that the chromophore of photoactive yellow protein undergoes a rapid in-plane deformation within 1 ps after photoexcitation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	20,000,000	6,000,000	26,000,000
2011年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2012年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
総計	37,800,000	1,134,000	49,140,000

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：時間分解分光、フェムト秒パルス、超高速反応、構造ダイナミクス、誘導ラマン、遷移状態、分子振動、ポテンシャル曲面

1. 研究開始当初の背景

反応する分子がどのように形を変え、やがて生成物になるのか？その一部始終を分子レベルで知ることは化学反応の究極の理解であり、物理化学者の長年の夢のひとつであ

る。結合の生成・解裂や分子の形の変化を捉えるため、これまでに、時間分解ラマン・赤外吸収などの「時間分解振動分光」を用いた反応性励起状態分子の構造研究が数多く報告されている。しかし、その大部分は反応過

程に現れる準安定中間状態の構造と分布数ダイナミクスに関する研究であったといえる。つまり、ポテンシャル曲面上の極小点に対応する反応体や生成体の静的構造を求めて両者の差異を議論し、反応体から生成体への分布数の移動の速度定数から反応速度を議論するものであった。しかし明らかに、反応体から生成体への構造変化は重い核の動きを伴うため瞬時的ではなく、分子振動の周期と同程度である数十～数百フェムト秒の時間を要する。従って、ポテンシャル極小点から次の極小点に至るまでに分子の構造は連続的に変化しているはずであり、その反応途中の構造変化を捉え、追跡することこそが真の意味での反応ダイナミクスの理解に繋がると考えられる。従って、反応している励起状態分子の連続的な構造ダイナミクスを実時間追跡することができる先鋭的な時間分解分光を開発・駆使し、多原子分子の反応座標の全貌を実験的に解明することが強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、極限的分子計測を駆使してフェムト秒の時間スケールで連続的に変化する反応分子の構造を追跡し、「多原子分子の反応座標」の全貌解明をめざす。特に、化学反応にとって最重要であるがこれまでほとんど実験研究されてこなかった遷移状態およびその近傍状態に迫る独創的な分光学的研究に取り組む。シアニン色素などの基本分子をはじめ光受容蛋白質などの生体分子系を研究対象とし、これらの超高速反応過程に現れる遷移状態・円錐交差点の近傍分子が示す低エネルギー電子遷移に着目した新規な分光手法を開発して研究を進める。特に、光子エネルギーの小さい赤外光を用いたポンプ-ダンブ-プローブ分光により遷移状態近傍分子を高感度に検出し、反応座標に沿った分子の動的振舞いを可視化する。さらに、フェムト秒誘導ラマン分光により“瞬時的な”振動スペクトルを取得し、構造化学的見地から分子レベルでの反応機構の解明をめざす。

3. 研究の方法

本研究では、複数の超短パルス光を用いたポンプ-ダンブ-プローブ分光およびフェムト秒誘導ラマン分光のための光源および測定装置を開発し、これらを駆使したフェムト秒構造ダイナミクス研究を展開した。

ポンプ-ダンブ-プローブ分光による研究では、光源である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) で2つの非同軸光パラメトリック増幅器 (NOPA) を励起し、独立に波長可変の2つの極短パルス (15~20 fs) を発生させた。1

つ目のパルスは試料分子の基底状態の電子吸収に共鳴するように調整し、それを2つに分けてそれぞれポンプ光、プローブ光として用いた。一方、2つ目のパルスは励起分子の誘導放出遷移の波長に重なるように調整し、それをダンブ光として用いた。試料を透過したプローブ光を分光器により波長分散し、そのスペクトルをフォトダイオードアレイで検出した。ポンプ光とダンブ光を別々のチョッパーで周期的に遮り、ポンプ ON/OFF とダンブ ON/OFF からなる4通り場合の信号を高感度に検出した。

フェムト秒誘導ラマン分光を用いた研究では、上記と同じチタンサファイア再生増幅器を光源として用い、試料を電子励起する Ex 光、ラマン励起する Rp 光、および信号検出のための Pr 光を発生させた。まず Ex 光としては基本波の第2高調波 (400 nm)、第3高調波 (267 nm)、または NOPA の出力 (480~700 nm) を用いた。Pr 光には通常、基本波をサファイア板に集光して得られるフェムト秒白色光を用いるが、本研究ではより広い帯域幅をもつ白色光を発生させることができる CaF₂ 板 (3mm 厚) を用いた。この CaF₂ 板は光損傷を受けるおそれがあるため、低速で連続的に並進移動させながら使用した。

高精度のラマンスペクトルを取得する上で要となる Rp 光には狭帯域性と波長可変性が要求される。そこで本研究ではまず、基本波 (800 nm) を2つに分けて別々の群遅延分散光学路に通し、正負に等量だけチャープしたパルスを発生させた後、非線形結晶中でこれらの和周波光を発生させた。チャープの符号が逆であるため和周波光の周波数が常に中央付近の狭い範囲に集まり、その結果、周波数幅 8~9 cm⁻¹ の狭帯域 400 nm 光を発生させることができた。次に、この狭帯域 400 nm 光をポンプ光とする2段の光パラメトリック増幅器を構成した。また、サファイア板で発生させたフェムト秒白色光を、回折格子とスリットを用いたスペクトルフィルターで狭帯域化し、それをシード光として使用した。これにより、480~860 nm で連続的に波長可変な狭帯域ピコ秒パルスを発生させることができた。さらにこのピコ秒パルスを第2高調波に変換し、最終的に 240~430 nm で波長可変、帯域幅 15 cm⁻¹、パルス幅 2~3 ps、パルスエネルギー 1 μJ 程度の Rp 光を発生することに成功した。

上記の Ex 光、Rp 光、Pr 光をフローセル中の同一点に集光し、Rp 光の ON/OFF による Pr 光スペクトル強度の変化を分光器と CCD カメラで検出し、誘導ラマン利得スペクトルを得た。

4. 研究成果

赤外光を用いたポンプ-ダンブ-プローブ

分光と紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン分光の装置を開発し、これらの独自の手法を駆使したフェムト秒構造ダイナミクス研究を推進した。

ポンプ-ダンプ-プローブ分光による研究では、超高速反応において決定的な役割を果たすポテンシャル近接領域の近傍の分子をターゲットにした挑戦的な分光研究をおこなった。特に、超高速光異性化をおこなう代表的な分子であるシアニン色素の励起状態における核波束運動の追跡を重点的に進めた。まず $S_1 \leftarrow S_0$ 電子吸収に共鳴する極短パルス光をポンプ/プローブ光として使い S_0 状態の褪色を観測した。さらに誘導放出の波長帯に共鳴するダンプ光を照射したところ、褪色信号の瞬時的な減少を確認した。これは反応途中の分子（の一部）がダンプ光によって強制的に S_0 状態に引き戻されることに対応し、ダンプ光照射時に S_1-S_0 エネルギー差とダンプ光子エネルギーが一致する状態に分子があることを意味する。そこでダンプ光波長を 690 nm、950 nm、1200 nm と変えた実験を行った結果、ダンプ効率が最大となる時刻は順に 97 fs、330 fs、390 fs のように、ダンプ光子エネルギーの減少とともに遅くなった。この実験結果は S_1, S_0 ポテンシャルが近接する”sink 領域”に向かって分子構造が有限時間をかけて変化することをあらわしている。これはいわば、反応性励起分子の反応座標に沿った連続的構造変化の追跡であり、超高速反応を理解する上で概念的に重要な結果として J. Am. Chem. Soc. 誌に掲載された。なお、ダンプ効果はダンプ波長を約 2000 nm まで変化させても確認された。これは、 S_0-S_1 光吸収の遷移エネルギーの約 1/4 まで両状態のポテンシャル曲面が接近した領域での核波束運動を観測したことを意味し、遷移状態近傍分子の分光研究に一步近づく重要な結果である。

フェムト秒誘導ラマン分光による研究では、独自に開発した紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン分光装置を駆使し、光受容タンパク質である Photoactive Yellow Protein (PYP) の発色団分子 (trans-p-クマル酸, pCA) の初期構造ダイナミクスを明らかにした。

PYP は紅色光合成細菌 *Halorhodospira halophila* から単離された光受容蛋白質で、この細菌の負の走光性をつかさどると考えられている。この蛋白質の機能は発色団分子の光吸収に始まり、いくつかの中間体を伴う一連の光サイクルにより発現する。このうち、100 ps より遅い時間領域に現れる中間体については共鳴ラマン、FTIR、X線回折、NMR などにより詳しく研究され、豊富な構造情報が得られている。それに対し、fs-ps の初期過程には不明な点が多く残されてきた。そこで PYP の初期過程を構造化学の立場から解明するために、その発色団分子 pCA の光励起ダイ

ナミクスを緩衝水溶液中で研究した。

まず、pCA を 315 nm 光で励起し過渡吸収スペクトルを測定した。光励起直後に 375 nm に励起状態吸収が観測され、それが 1 ps 以内に 355 nm までシフトした。また可視域には誘導放出も観測された。その後、両者はともに 2.5 ps の時定数で減衰した。この観測結果は、pCA が 1 ps 以内に何らかのダイナミクスを示した後、緩和した S_1 状態が 2.5 ps の寿命で S_0 状態に戻ることを示している。

次に、光励起直後の構造ダイナミクスを調べるために紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン測定を行った。上述のとおり、pCA は紫外領域に過渡吸収を示すために、励起状態のラマン信号を測定するためには紫外共鳴条件が必須であり、本研究において初めて、紫外共鳴フェムト秒ラマンスペクトルを取得することができた。測定の結果、指紋領域において多くの過渡バンドを観測し、特に 1 ps 以内に明確なスペクトル変化が見られた。例えば、1573 cm^{-1} や 812 cm^{-1} のバンドは高波数シフトを示した。また、励起直後に見られる 1180 cm^{-1} バンドが消滅するとともに 1150 cm^{-1} バンドが現れた。これらのスペクトル変化は、pCA 分子がフェムト秒時間スケールで構造変化を起こすことを示している。一方で、 S_0 状態と S_1 状態のスペクトルは比較的良く似たパターンを示すことも分かった。このことから、C=C 結合まわりのねじれなどの大きな構造変化ではなく、面内の変形がすばやく起こっていると考えられる。ab initio 計算による研究でも、フランク・コンドン状態から緩和した S_1 状態に至る過程で $C_{ph}-C_{et}=C_{et}$ 角が小さくなる面内変形が起こることが報告されており、上述の結果と整合している。本研究により、PYP 発色団分子の励起状態の共鳴ラマンスペクトルを初めて取得することができ、それにより、この分子が光励起後のフェムト秒時間スケールで面内変形を起こして（準安定の） S_1 状態に至り、その後、2.5 ps で基底状態に戻ることが明らかになった。この結果は PYP の光初期過程を理解する上での第一ステップとして重要であり、J. Phys. Chem. Lett. 誌に掲載された。

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 7 件)

(1) S. Inada, M. Mizuno, Y. Kato, A. Kawanabe, H. Kandori, Z. Wei, S. Takeuchi, T. Tahara, Y. Mizutani, "Primary Structural Response in Tryptophan Residues of Anabaena Sensory Rhodopsin to Photochromic Reactions of the Retinal Chromophore", Chem. Phys., in-press (2013). (査読有り)

(2) M. Iwamura, K. Nozaki, S. Takeuchi, T. Tahara, "Real-time Observation of Tight Au-Au Bond Formation and Relevant Coherent Motion upon Photoexcitation of [Au(CN)₂] Oligomers", *Journal of the American Chemical Society (Communications)*, 135, 538 - 541 (2013). (査読有り)

(3) H. Kuramochi, S. Takeuchi, T. Tahara, "Ultrafast Structural Evolution of Photoactive Yellow Protein Chromophore Revealed by Ultraviolet Resonance Femtosecond Stimulated Raman Spectroscopy", *Journal of Physical Chemistry Letters* 3, 2025 - 2029 (2012). (査読有り)

(4) T. Nakamura, S. Takeuchi, T. Taketsugu, T. Tahara, "Femtosecond Fluorescence Study of the Reaction Pathways and Nature of the Reactive S₁ State of Cis-Stilbene", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14, 6225 - 6232 (2012). (査読有り)

(5) 竹内佐年, 田原太平、「反応座標の全貌解明をめざしたフェムト秒構造化学研究」、レーザー研究、40、759 - 765 (2012). (査読有り)

(6) Z. Wei, T. Nakamura, S. Takeuchi, T. Tahara, "Tracking of the Nuclear Wavepacket Motion in Cyanine Photoisomerization by Ultrafast Pump-Dump-Probe Spectroscopy", *Journal of the American Chemical Society*, 133, 8205 - 8210 (2011). (査読有り)

(7) M. Iwamura, H. Watanabe, K. Ishii, S. Takeuchi, T. Tahara, "Coherent Nuclear Dynamics in Ultrafast Photoinduced Structural Change of Bis-diimine Copper(I) Complex", *Journal of the American Chemical Society*, 133, 7728 - 7736 (2011). (査読有り)

[学会発表] (計 40 件)

《招待講演》

(1) S. Takeuchi, H. Kuramochi, T. Tahara, "Femtosecond Raman tracking of primary structural evolution in photoreceptor chromophore", The 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei (Taiwan), October 23-27, 2012.

(2) S. Takeuchi, H. Kuramochi, T. Tahara, "Femtosecond Raman study of structural evolutions in photoreceptor chromophore", The 23rd International Conference on Raman Spectroscopy, Indian Institute of Science, Bangalore (India), August 12-17, 2012.

(3) S. Takeuchi, T. Tahara, "Femtosecond Raman tracking of structural evolution in reacting molecules", The 16th East Asian Workshop on Chemical Dynamics, Hsinchu (Taiwan), April 16-19, 2012.

(4) S. Takeuchi, T. Tahara, "Spectroscopic

Tracking of Structural Evolution in Reacting Molecules by Multi-pulse Ultrafast Spectroscopy", 8th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, Konkuk University, Seoul (Korea), October 28-31, 2011.

(5) S. Takeuchi, T. Tahara, "Time-domain Raman study of structural evolution in ultrafast reactions", Joint of Morino Lecture and International Workshop, Spectroscopy on photoinduced functions of electrons and spins in biology and material science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo (Japan), October 13, 2011.

(6) 竹内佐年、「反応座標の可視化を目指したフェムト秒構造ダイナミクス研究」、第 12 回エクストリームフォトンクス研究シンポジウム、和光、埼玉、2011 年 6 月 30 日。

(7) S. Takeuchi, T. Tahara, "Time-domain Raman study of ultrafast structural dynamics in reacting molecules", The 7th Asia-Pacific Laser Symposium, Jeju (Korea), May 11-15, 2010.

《一般発表》

(8) 倉持 光、竹内佐年、上久保裕生、片岡幹雄、田原太平、「フェムト秒時間領域ラマン分光法を用いたイエロープロテイン励起状態における初期構造ダイナミクスの観測」、第 93 日本化学会春季年会講演会、立命館大学、草津、滋賀、2013 年 3 月 22-25 日。

(9) 藤澤知績、竹内佐年、増田信二、田原太平、「フェムト秒過渡吸収分光による青色光センサー-BLUF タンパク質 PapB の光活性化機構の研究」、第 93 日本化学会春季年会講演会、立命館大学、草津、滋賀、2013 年 3 月 22-25 日。

(10) 藤澤知績、竹内佐年、増田信二、田原太平、「青色光センサー-BLUF タンパク質 PapB の超高速光活性化」、平成 24 年度日本分光学会年次講演会、東京工業大学、大岡山、東京、2012 年 11 月 27-29 日。

(11) 倉持 光、竹内佐年、上久保裕生、片岡幹雄、田原太平、「イエロープロテイン励起状態におけるフェムト秒構造ダイナミクスの実時間追跡」、第 6 回分子科学討論会、東京大学、東京、2012 年 9 月 18-21 日。

(12) Z. Wei、竹内佐年、田原太平、「Trial to observe wavepacket motions near the potential "funnel" in stilbene photoisomerization by pump-dump-probe spectroscopy」、第 6 回分子科学討論会、東京大学、東京、2012 年 9 月 18-21 日。

(13) 浅野素子、北林真人、秋田康宏、山下健一、杉浦健一、竹内佐年、田原太平、「環状および鎖状亜鉛ポルフィリン多量体の励起緩和」、2012 年 光化学討論会、東京工業大学大岡山キャンパス、東京、2012 年 9 月 12-14 日。

(14) 岩村宗高、野崎浩一、竹内佐年、田原

太平、「ジシアノ金(I)錯体会合体の光誘起構造変化ダイナミクス」、第24回配位化合物の光化学討論会、東京大学生産技術研究所コンベンションホール、目黒、東京、2012年8月6-8日。

(15) 浅野素子、北林真人、秋田康宏、山下健一、杉浦健一、竹内佐年、田原太平、「亜鉛ポルフィリン環状・鎖状多量体のS2発光ダイナミクス—エネルギー移動と位相緩和—」、第24回配位化合物の光化学討論会、東京大学生産技術研究所コンベンションホール、目黒、東京、2012年8月6-8日。

(16) S. Takeuchi, H. Kuramochi, T. Tahara, “Ultraviolet-Resonance Femtosecond Stimulated Raman Study of the Initial Events in Photoreceptor Chromophore”, 18th International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne (Switzerland), July 8-13, 2012.

(17) 浅野素子、山下健一、杉浦健一、竹内佐年、田原太平、「ポルフィリン多量体における励起エネルギー移動～長距離相互作用と位相緩和～」、特定領域研究「高次系分子科学」成果公開シンポジウム、東京工業大学すずかけ台キャンパス、神奈川、2012年5月25-26日。

(18) 細井晴子、山口祥一、竹内佐年、田原太平、「蛍光たんぱく質の隠れた電子励起状態」、特定領域研究「高次系分子科学」成果公開シンポジウム、東京工業大学すずかけ台キャンパス、神奈川、2012年5月25-26日。

(19) 竹内佐年、Sanford Ruhman、常田貴夫、千葉真人、武次徹也、田原太平、「フェムト秒ラマン分光を用いた反応分子の実時間構造追跡」、「分子システム研究」第1回春季研究会、浜名湖ロイヤルホテル、浜松、静岡、2012年5月22-23日。

(20) 岩村宗高、今村知嗣、木本健嗣、野崎浩一、竹内佐年、田原太平、「ジシアノ金(I)錯体会合体の光励起による金原子間結合生成を伴う構造緩和ダイナミクス」、日本化学会第92春季年会、日吉、神奈川、2012年3月25-28日。

(21) 竹内佐年、倉持光、田原太平、「紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン分光によるシス-スチルベンS1状態の指紋領域スペクトルの観測」、第5回分子科学討論会、札幌、北海道、2011年9月20-23日。

(22) L. hua、竹内佐年、田原太平、「Studying the substituent effect on the ultrafast structural distortions in bis(diimine) Cu(I) complexes via nuclear wavepacket motion」、第5回分子科学討論会、札幌、北海道、2011年9月20-23日。

(23) Z. Wei、竹内佐年、田原太平、「Parallel Relaxation pathways of Malachite Green Revealed by Ultrafast Pump-Dump-Probe Spectroscopy」、第5回分子科学討論会、札幌、北海道、2011年9月20-23日。

(24) 倉持光、竹内佐年、田原太平、「紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン分光によるイエロープロテイン発色団の超高速励起状態構造ダイナミクスの観測」、第5回分子科学討論会、札幌、北海道、2011年9月20-23日。

(25) 細井晴子、田山亮、竹内佐年、水野秀昭、宮脇敦史、田原太平、「GFP発色団モデル化合物における二光子吸収スペクトルの溶媒依存性」、第5回分子科学討論会、札幌、北海道、2011年9月20-23日。

(26) H. Hosoi, S. Yamaguchi, S. Takeuchi, T. Tahara, “Hidden electronic excited state of enhanced green fluorescent protein observed by multiplex two-photon absorption spectroscopy”, 5th International Symposium of Molecular Science for Supra Functional Systems, Sapporo, Japan, July 11-13, 2011.

(27) Z. Wei, T. Nakamura, S. Takeuchi, T. Tahara, “Ultrafast wavepacket motion in photoisomerization of cyanine dye studied by pump-dump-probe spectroscopy”, 5th International Symposium of Molecular Science for Supra Functional Systems, Sapporo, Japan, July 11-13, 2011.

(28) 倉持光、竹内佐年、田原太平、「紫外共鳴フェムト秒誘導ラマン分光によるイエロープロテイン発色団の超高速励起状態構造ダイナミクスの観測」、第12回エクストリームフォトニクス研究シンポジウム、和光、埼玉、2011年6月30日。

(29) Z. Wei、竹内佐年、田原太平、「New Relaxation Dynamics of Malachite Green Revealed by Ultrafast Pump-Dump-Probe Spectroscopy」、第12回エクストリームフォトニクス研究シンポジウム、和光、埼玉、2011年6月30日。

(30) Z. Wei, T. Nakamura, S. Takeuchi, T. Tahara, “Tracking the Ultrafast Wavepacket Motion in Barrierless Cyanine Photoisomerization by Femtosecond Pump-Dump-Probe Spectroscopy”, XVth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy, Monte Verita, Ascona (Switzerland), June 19-24, 2011.

(31) H. Kuramochi, S. Takeuchi, T. Tahara, “Ultrafast Excited-State Structural Dynamics in Photoactive Yellow Protein Chromophore Revealed by Tunable UV Femtosecond Stimulated Raman Spectroscopy”, XVth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy, Monte Verita, Ascona (Switzerland), June 19-24, 2011.

(32) 田山亮、竹内佐年、田原太平、水野秀昭、宮脇敦史、細井晴子、「GFP発色団モデル化合物における二光子吸収スペクトルの溶媒依存性」、日本化学会第91春季年会、横浜、神奈川、2011年3月26-29日。

(33) 竹内佐年, S. Fechner, 田原太平, 「波長可変狭帯域ピコ秒光源の開発とフェムト秒誘導ラマン分光への応用」、第11回エクストリームフォトニクスシンポジウム、和光、埼玉、2010年10月12-13日。

(34) 倉持光、鈴木正、Bo Albinsson、竹内佐年、田原太平、市村禎二郎, 「DNA/RNA 誘導体の超高速励起状態ダイナミクス」、第11回エクストリームフォトニクスシンポジウム、和光、埼玉、2010年10月12-13日。

(35) Z. Wei, 中村 巧, 竹内佐年, 田原太平, 「Real-time Observation of the Wavepacket Motion in Photoisomerization of Cyanine Dye by Ultrafast Pump-Dump-Probe Technique」、第11回エクストリームフォトニクスシンポジウム、和光、埼玉、2010年10月12-13日。

(36) S. Fechner, 竹内佐年、田原太平, 「Study of the photodissociation of diphenylcyclopropene in solution using femtosecond stimulated Raman scattering」、第11回エクストリームフォトニクスシンポジウム、和光、埼玉、2010年10月12-13日。

(37) 倉持光、鈴木正、Bo Albinsson、竹内佐年、田原太平、市村禎二郎, 「チオおよびアザ置換核酸塩基の励起状態ダイナミクス」、分子科学討論会、豊中、大阪府、2010年9月14-17日。

(38) 竹内佐年、S. Fechner、田原太平, 「フェムト秒誘導ラマン分光装置の開発と光反応初期構造追跡への応用」、分子科学討論会、豊中、大阪府、2010年9月14-17日。

(39) Z. Wei, 中村 巧, 竹内佐年, 田原太平, 「Quantitative Characterization of the Wavepacket Motion in Cyanine Photoisomerization by Ultrafast Pump-Dump-Probe Spectroscopy」、分子科学討論会、豊中、大阪府、2010年9月14-17日。

(40) S. Takeuchi, M. Iwamura, H. Watanabe, T. Tahara, “Time-Domain Raman Tracking of Ultrafast Flattening Distortion in Organometallic Complex”, 17th International Conference on Ultrafast Phenomena, Snowmass, Colorado (USA), July 18-23, 2010.

[図書] (計2件)

(1) S. Takeuchi, H. Kuramochi, T. Tahara, “Ultraviolet resonance femtosecond stimulated Raman study of the initial events in photoreceptor chromophore”, Proceedings of the 18th International Conference on Ultrafast Phenomena, EPJ Web of Conferences 41, 08002 (2013), M. Chergui, A. Taylor, S. Cundiff, R. de Vivie-Riedle, K. Yamanouchi ed., EDP Science.

(2) S. Takeuchi, M. Iwamura, H. Watanabe, T. Tahara, “Time-domain Raman tracking of ultrafast flattening distortion in organometallic complex”, Proceedings of the 17th International

Conference on Ultrafast Phenomena, M. Chergui, D. M. Jonas, E. Riedle, R. W. Schoenlein, A. J. Taylor ed., Oxford, pp 385-387 (2011).

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.go.jp/lab-www/spectroscopy/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 佐年 (TAKEUCHI SATOSHI)

独立行政法人理化学研究所・田原分子分光研究室・専任研究員

研究者番号：50280582

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

Zhengrong Wei

独立行政法人理化学研究所・田原分子分光研究室・特別研究員

倉持 光 (KURAMOCHI HIKARU)

独立行政法人理化学研究所・田原分子分光研究室・博士課程学生