

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25104005

研究課題名(和文) 先端的な超高速分光と非線形分光による多自由度複雑分子系の研究

研究課題名(英文) Study of Complex Molecular Systems by Ultrafast and Nonlinear Spectroscopy

研究代表者

田原 太平 (TAHARA, Tahei)

国立研究開発法人理化学研究所・田原分子分光研究室・主任研究員

研究者番号：60217164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 108,500,000円

研究成果の概要(和文)：最高の分光計測を開発・駆使して多自由度複雑分子系の研究を行った。領域の研究者との共同研究を強力に進めながら多くの研究成果をあげた。特に(1)超高速分光では独自の時間分解インパルス誘導ラマン分光法の極限化を推し進めるとともに、種々の生体分子、超分子、機能性分子の超高速過程を解明した。(2)界面選択的非線形分光では、我々が開発したヘテロダイン検出振動和周波発生分光法を駆使して界面水構造を解明し、また二次元分光法や紫外励起時間分解測定に発展させて界面のダイナミクス研究を実現した。(3)単分子分光では、独自の二次元蛍光寿命相関分光法を開発してタンパク質の折り畳み過程を研究し、新しい重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We studied complex molecular systems by the best spectroscopic measurements. We made numerous research achievements, while strongly promoting collaboration with researchers in this project. Particularly, (1) in ultrafast spectroscopy, we have realized an "ultimate" form of time-resolved impulsive stimulated Raman spectroscopy that we developed. We also clarified the ultrafast process of various biomolecules, supramolecules and functional molecules. (2) In interface-selective nonlinear spectroscopy, we have investigated interfacial water structure by utilizing heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation spectroscopy (HD-VSFG) developed by us. We also studied interfacial dynamics by developing two-dimensional HD-VSFG spectroscopy and time-resolved measurement with ultraviolet excitation. (3) In the study of single molecule spectroscopy, we developed 2D fluorescence lifetime correlation spectroscopy. We studied protein folding processes, and obtained new important findings.

研究分野：物理化学

キーワード：複雑分子系 先端分光計測 超高速ダイナミクス 界面 生体分子

1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の長足の発達によって基本分子のダイナミクス研究は飛躍的に進み、われわれの研究室でも本研究の開始までにすでに 10 フェムト秒にいたる時間分解能で多様な分光実験を行っていた。昨今アト秒パルスの発生とそれを用いた研究が注目されているが、これは本質的に軟 X 線領域の実験であるので、可視、紫外光による価電子励起あるいは熱励起による通常の意味での化学過程の研究における時間分解能向上の試みはほぼ終わったと言える状況であった。したがって、基本分子の研究で蓄積された知識と技術をベースに如何に新しい研究を切り拓くかが、分光計測分野の大きな問題であった。私はその最も重要な研究ターゲットは生体系を頂点とする高い機能を有する複雑分子系であると考えていた。

このような問題意識に立脚して、我々の研究グループでは基本分子の超高速分光の研究で培った高い技術を駆使して、生体関連分子、超分子、金属錯体など複雑分子系のダイナミクス研究に舵を切ろうとしていた。また同時に、最も重要な不均一場である界面の研究の重要性を強く認識し、一群の新しい界面選択的非線形分光を開発してこれを用いた液体界面の研究を推進し、すでに成功を収めつつあった。特に我々が開発したヘテロダイン検出和周波発生分光からは界面でのみ発する非線形信号光の電場の振幅と位相情報を得ることができ、これによって溶液の可視・赤外スペクトルに直接比較できる界面選択的電子・振動スペクトルが得られるようになったため、界面分光の分野のブレークスルーと認識されはじめた。これらの複雑な分子系へ向けた研究を推進する中で、複雑分子系の本質は内部自由度が極めて大きく、系が必要に応じて柔軟に変化して高い機能を発現することにある、という認識を持つに至った。そして、この「複雑分子系の柔らかさ」の問題を中心に据え、理論化学、タンパク化学、合成化学の研究者と連携しつつ、先端分光計測を駆使した複雑分子系の研究を行うことが極めて重要であると確信し、本課題を推進するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々が持つ世界最高の分光計測技術を駆使、あるいはさらに新しい計測法を開発することで、大きい自由度をもつ複雑分子系のダイナミクスと機能発現機構を解明することである。具体的には、以下の3つの課題を骨子として推進する：(1) 超高速分光を駆使した柔らかな生体分子や超分子のダイナミクスの観測と機能発現初期過程の解明、(2) 独自の界面選択的非線形分光による生体膜モデル界面をはじめとする柔らかな界面の構造と機能の解明、(3) 柔らかな生体高分子の構造揺らぎを研究するための新しい分光計測の開発とそれを用

いた生体高分子の構造ダイナミクスの解明。これら計測研究を強力に推進するとともに、本新学術領域内で進められる他の計測研究や理論研究と連携して現象の包括的理解を行い、さらにタンパク科学や合成化学によって生み出される新しい機能をもつタンパク質や超分子の研究を行うことによって、複雑分子系の性質と機能を総合的に解明・理解することを目指した。

3. 研究の方法

超高速分光、界面選択的非線形分光、単分子分光による研究の方法を以下に記す。

(1) 超高速分光計測

フェムト秒チタンサファイアレーザー再生増幅器を光源とした装置群を用いて超高速分光計測を行った。具体的には光パラメトリック増幅器の出力をベースとする時間分解吸収分光、蛍光アップコンバージョン(それぞれ時間分解能 <100 fs)、および後述する新たに開発した可視 6 fs パルス光源をベースとするフェムト秒時間分解インパルスラマン分光の3つの手法を複合的に利用した。

(2) 界面選択的非線形分光計測

界面の研究には、二次的非線形分光の一種である和周波発生(VSFG)分光法に我々独自の位相分解法を付加したヘテロダイン検出和周波発生(HD-VSFG)分光法を用いた。二次的非線形光学過程には対称性のある媒質からは生じないという原理的な界面選択性があり、液体やほとんどの固体のバルクからは生じない。このため分子レベルで界面の情報を選択的に得ることができる。従来のVSFG法では二次非線形感受率の二乗($| \chi^{(2)} |^2$)しか得られないが、我々のHD-VSFG分光法では複素⁽²⁾そのものを得ることが出来、これが界面構造を分光解析するうえで本質的に重要である。

上記のHD-VSFGをプローブに用い、これに赤外ポンプ光 ω_{pump} を加えて時間分解ヘテロダイン検出和周波発生(TR-HD-VSFG)分光測定を行った。時間分解能はおよそ200 fsである。さらに、TR-HD-VSFGスペクトルの ω_{pump} 依存性を測定し、これを内挿することで二次元HD-VSFG分光に発展させ、また紫外光を励起光として用いてTR-HD-VSFG測定を行うことで界面の光化学反応を実時間追跡した。

(3) 単分子分光計測

生体高分子の自発的な構造ダイナミクスを調べるため、蛍光共鳴エネルギー移動(FRET)とパルスレーザーを用いた時間相関光子計数法(TCSPC)を組み合わせる研究を行った。測定対象分子を二種類の色素(ドナー/アクセプター)で標識し、それらの間のFRET効率の変化をドナー蛍光寿命の変化を通して計測した。実験は単一分子レベルの濃度条件で行い、各蛍光光子の到着時刻と励

起・発光遅延時間を記録した光子データを得て解析に用いた。

4. 研究成果

本新学術領域研究の他の研究グループとの多数の共同研究を含め、超高速分光計測、界面選択的非線形分光計測、単分子分光計測を用いた研究のそれぞれで、多くの優れた成果を得ることが出来た。以下、それら成果の中の代表的なものについて述べる。

(1) 超高速分光計測による成果

ナトリウムイオン輸送ロドプシン KR2 の超高速光反応の解明

近年、ナトリウムイオンを輸送する微生物型ロドプシン KR2 が初めて発見された。KR2 のナトリウムイオン輸送機構を解明するため、様々な分光法を用いて KR2 の光反応が精力的に研究されている。その一方、発色団の光異性化などの重要な過程を含むフェムト・ピコ秒領域の光反応初期過程はまだ研究されていなかった。そこでこの早い時間領域の光反応ダイナミクスを明らかにするため、KR2 のフェムト秒時間分解吸収分光測定を行った。その結果、 S_1 状態に由来する信号の減衰に伴い、光反応生成物である J 中間体の吸収信号が 180 fs で現れるのを観測した。このことは発色団の光異性化がわずか 180 fs で起こることを意味する。これは最もよく研究されているプロトン輸送ロドプシンであるバクテリオロドプシンよりも 3 倍速い。このようにナトリウムイオン輸送ロドプシンの超高速光反応の観測に初めて成功した。

定常および時間分解蛍光分光を用いた新規芳香族ミセルの内部局所環境の研究

最近開発された芳香族ミセルは芳香族部位をもつ複数の両親媒性分子が水中で自己組織的に集まり、その内部に疎水的環境を有するナノサイズの空洞を作る新しいタイプの包摂系として注目を集めている。我々は、この新規に開発された芳香族ミセル内部の局所的な環境を明らかにするために蛍光プローブ分子(クマリン 153)をこのミセルに包摂させ、その定常およびフェムト~ピコ秒時間分解蛍光分光による研究を行った。実験の結果、包摂されたプローブ分子の吸収スペクトルは水溶液の場合よりもさらに長波長側に観測されたため、ミセル内部は高い極性環境を持つと考えられた。一方、フェムト秒蛍光分光の結果から、プローブ分子の光励起に対するミセル内部の変化は限定的な振幅のすばやい応答であることが明らかとなった。またフェムト秒蛍光偏光異方性の測定で、ゲスト分子の包摂によって回転緩和時間が 510 ps から 860 ps に増大することがわかった。これは芳香族ミセルがゲスト分子の有無に応じて柔軟に大きさを変える、いわば動的包摂といえる特性を持つことを示唆してい

る。

可視 6 fs パルスを用いた時間分解インパルスプラマン分光装置の開発

フェムト秒スケールで起こる分子の構造変化を追跡することが出来る独自の手法“時間分解インパルスプラマン分光法 (TR-ISRS)”の極限化を推し進めた。特に、高安定可視 6 fs パルス光源を取り入れた新たな装置の開発を行った。これにより、THz 領域から周期わずか 11 fs と従来この方法では測定困難であった CH 伸縮振動などを含む分子のあらゆる振動基音を時間領域で観測することが可能となった。また光学素子・機器・光源の最適化により、核波束運動に伴う 10^{-6} OD オーダーの吸光度変化が検出可能になるなど、測定感度の圧倒的な向上を実現した。

光応答性タンパク質の機能発現に関わるフェムト秒構造ダイナミクスの観測

新たに製作した 6 fs パルスを取り入れた TR-ISRS 装置を用いてイエロープロテイン (YFP) や緑色蛍光タンパク質 (GFP) など、光応答性タンパク質の光反応初期過程を研究し、その機能発現初期過程における鍵となる重要なフェムト秒構造変化を明らかにして従来の理解を刷新する知見を得た。具体的には、YFP のフェムト秒の時間スケールで進行する発色団近傍の水素結合構造の変化を初めて観測することに成功した。さらに、最先端の大型放射光施設を用いた時間分解 X 線結晶構造解析による研究でも明確に構造が決まらず、世界的な論争となっていた反応中間体の構造を TR-ISRS に量子化学計算を援用して決定した。また GFP に関しては、GFP の光誘起プロトン移動反応へのコヒーレンスの寄与についてこの 10 年信じられていた機構が誤りであることを示し、議論を要しない極めて明確なデータを得て、これを元に新しい機構を提示した。

(2) 界面選択的非線形分光計測による成果

界面の水構造の解明

イオン性単分子膜と水溶液の界面について、界面水の構造に及ぼす対イオン効果を調べた。正に帯電した界面においては界面水に由来する OH バンドの強度がアニオンの付加によってホフマイスター系列に従って減少した。このことは、アニオンの界面への吸着力がホフマイスター系列を決定しているとする既存のモデルとよく一致する。それに対して、負に帯電した界面では OH バンドの振動数、つまり水素結合強度がカチオンの付加によってホフマイスター系列に沿って変化することを初めて見いだした。この観測を元に 19 世紀来の謎であるホフマイスター塩効果の機構について新しい考えを提唱した。次に、空気/水界面の⁽²⁾のスペクトルを高

い精度で測定し、水表面の水素結合構造との関連で議論がなされてきた 3000cm^{-1} 付近の正のバンドが位相校正の問題で生じた偽バンドである可能性が高いことを示した。さらに、HD-VSFG 分光測定と分子動力学 (MD) 計算とを協奏的に用いて、溶質としてフェノールが存在する場合の空気/水界面の構造を研究した。これによってそれぞれのフェノール分子の周囲に特有の水和構造が形成され、その水合構造中には2種類の独特な水素結合を持つ水が生じることが明らかになった。

水界面の振動ダイナミクスの観測

空気/水界面における界面水の超高速振動ダイナミクスを TR-HD-VSFG と MD シミュレーションを用いて研究した。本研究では水素結合 OH バンドの低波数側と高波数側を選択的に振動励起した。その結果、励起直後には励起波数の違いを反映して異なる過渡スペクトルが確認されたが、0.5 ピコ秒後にはほとんど同様のスペクトルになることが明らかとなった。この実験結果は、スペクトル拡散が励起波数によらず効率よく進行していることを示している。また、MD シミュレーションを用いて空気/水界面の速度・速度自己相関関数の時間変化を計算したところ実験結果をよく再現する結果を得た。以前、別の研究グループによって、水界面の振動ダイナミクスは極めて遅いスペクトル拡散を示すという主張がされていたが、我々の研究によって、そのような特異な振動ダイナミクスを支持する根拠はなく、水素結合 OH バンドのスペクトル拡散は励起波数によらずフェムト秒領域で進むことが明らかとなった。

界面の光化学反応の追跡

紫外励起光を用いた研究では空気/水界面における溶媒和電子の実時間観測に成功した。これまでバルク溶液中の溶媒和電子については詳細に調べられてきたが、界面における溶媒和電子については分かっていなかった。そこで紫外光励起時間分解ヘテロダイナミック検出振動和周波分光法を開発し、これを水表面の溶媒和電子の観測に適用した。紫外光照射で水表面付近に電子を発生させると、電子を水和している水分子の OH 伸縮に帰属できる信号が観測された。このバンドの解析から、水表面の電子は部分的に溶媒和された構造をとり、約 100 ピコ秒内に水中に拡散していくことがわかった。

(3) 単分子分光計測による成果

二次元蛍光寿命相関分光法 (2D-FLCS) の開発

TCSPC 法を用いて得られた光子データを解析する新しい手法、二次元蛍光寿命相関分光法 (2D-FLCS) を開発した。2D-FLCS では、光子データを元に蛍光光子を励起・発光遅延時間毎に分類して光子対の相関を得、これを二

次元マップの形で表す。次にこの二次元マップを、逆ラプラス変換を用いて蛍光寿命の異なる種ごとの相関に変換する。この 2D-FLCS によって複雑分子の平衡ダイナミクスを単一分子レベル・マイクロ秒の時間分解能で可視化することができるようになった。2D-FLCS を用いて DNA ヘアピンの構造ダイナミクスを調べた。実験では、DNA ヘアピンの両端を FRET 対で標識することで、DNA ヘアピンが取る異なる構造 (開状態・閉状態) を蛍光寿命の違いとして区別できるようにした。その結果、FRET ドナーの蛍光寿命の二次元相関マップにおいて、開状態と閉状態の間の平衡ダイナミクスが、対応する蛍光寿命ピーク間のクロスピークの出現として観測され、この新しい分光法の有効性と高いポテンシャルが示された。

2D-FLCS によるシトクロム *c* の構造ダイナミクスの計測

2D-FLCS をタンパク質の問題に初めて適用し、酸変性条件下でのシトクロム *c* の構造ダイナミクスの計測を行った。その結果、3つの構造アンサンブルが分離され、さらに各アンサンブル内でマイクロ秒以下~数マイクロ秒の構造転換を示す相関信号を観測することに成功した。これは従来の一分子 FRET による計測では到達できなかった時間領域のダイナミクスであり、タンパク質ダイナミクス研究における 2D-FLCS の有効性が実証されたと同時に、分子動力学シミュレーションとの比較が可能な時間領域であることから、新たな実験・理論の融合研究への道を開く結果であると言える。

2D-FLCS を用いた DNA と RNA のヘアピン構造の形成・解離機構の研究

DNA と RNA は化学的に極めて類似しているにも関わらず、生体における役割は大きく異なる。我々はこの違いを生む分子レベルでの起源を解明するため、2D-FLCS を用いたダイナミクスの比較実験を行った。温度制御が可能な二色検出 2D-FLCS 測定装置を製作し、同等の配列をもつヘアピン RNA/DNA の構造形成速度・解離速度を測定したところ、後者の温度依存性は類似していたのに対し、前者は DNA ではほとんど温度変化が見られない一方、RNA では大きく変化することが分かった。これは、RNA がもつ 2'-ヒドロキシ基が関与する水素結合により、ヌクレオチド鎖の物性が大幅に変化することを示唆している。

2D-FLCS を用いた BdpA の折り畳み自由エネルギー地形の観測

2D-FLCS を用いて小さなヘリックスタンパク質であるプロテイン A の B ドメイン (BdpA) の折り畳み過程を調べた。その結果、本来二状態的な折り畳みを示すタンパク質であるにも関わらず、天然状態と変性状態の両方が不均一な構造分布をもっており、各構

造アンサンブル内での構造変化が 10 マイクロ秒以内に起こっていることが示された。このように 2D-FLCS を用いることで、タンパク質の天然状態における構造不均一性を一分子レベルで直接観測することに成功した。

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 57 件)

1. T. OTOSU, K. ISHII, H. OIKAWA, M. ARAI, S. TAKAHASHI, T. TAHARA, Highly heterogeneous nature of the native and unfolded states of B domain of protein A revealed by two-dimensional fluorescence lifetime correlation spectroscopy, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, 121, 5463-5473 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b00546
2. M. M. SARTIN, K. KONDO, M. YOSHIKAWA, S. TAKEUCHI, T. TAHARA, Local environment inside a novel aromatic micelle investigated by steady-state and femtosecond fluorescence spectroscopy of an encapsulated solvatochromic probe, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, 19, 757 - 765 (2017). DOI: 10.1039/C6CP06174E
3. H. KURAMOCHI, S. TAKEUCHI, K. YONEZAWA, H. KAMIKUBO, M. KATAOKA, T. TAHARA, Probing ultrafast photoreceptive responses inside photoactive yellow protein with time-domain Raman, *Nat. Chem.*, 査読有, 9, 660-666 (2016). DOI: 10.1038/nchem.2717
4. P. C. SINGH, K. INOUE, S. NIHONYANAGI, S. YAMAGUCHI, T. TAHARA, Femtosecond hydrogen-bond dynamics of bulk-like and bound water at positively and negatively charged lipid interfaces revealed by 2D HD-VSFG spectroscopy, *Angew. Chem. Int. Ed.* 査読有, 55, 10621 -10625 (2016). DOI: 10.1002/anie.201603676
5. K. MATSUZAKI, R. KUSAKA, S. NIHONYANAGI, S. YAMAGUCHI, T. NAGATA, T. TAHARA, Partially hydrated electrons at the air/water interface observed by UV-excited time-resolved heterodyne-detected vibrational sum frequency generation spectroscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 138, 7551-7557 (2016). DOI: 10.1021/jacs.6b02171
6. K. INOUE, T. ISHIYAMA, S. NIHONYANAGI, S. YAMAGUCHI, A. MORITA, T. TAHARA, Efficient spectral diffusion at the air/water interface revealed by femtosecond time-resolved heterodyne-detected vibrational sum frequency generation spectroscopy, *J. Phys. Chem. Lett.*, 査読有, 7, 1811-1815, (2016). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.6b00701
7. H. KURAMOCHI, S. TAKEUCHI, T. TAHARA, Femtosecond time-resolved impulsive stimulated Raman spectroscopy using Sub-7-fs pulses: Apparatus and applications, *Rev. Sci. Instrum.*, 査読有, 87, 043107/1-10 (2016). DOI: 10.1063/1.4945259
8. T. FUJISAWA, H. KURAMOCHI, H. HOSOI, S. TAKEUCHI, T. TAHARA, Role of coherent low-frequency motion in excited-state proton transfer of green fluorescent protein studied by time-resolved impulsive stimulated Raman spectroscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 138, 3942-3945 (2016). DOI: 10.1021/jacs.5b11038
9. S. TAHARA, S. TAKEUCHI, R. ABE-YOSHIZUMI, K. INOUE, H. OHTANI, H. KANDORI, T. TAHARA, Ultrafast photoreaction dynamics of a light-driven sodium-ion-pumping retinal protein from *Krokinobacter eikastus* revealed by femtosecond time-resolved absorption spectroscopy, *J. Phys. Chem. Lett.* 査読有, 6, pp 4481-4486 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b01994
10. T. OTOSU, K. ISHII, T. TAHARA, Microsecond protein dynamics observed at the single molecule level, *Nat. Commun.*, 査読有, 6, 7685 (2015). DOI: 10.1038/ncomms8685
11. S. NIHONYANAGI, S. YAMAGUCHI, T. TAHARA, Counterion effect on interfacial water at charged interfaces and its relevance to the Hofmeister series, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 136, 6155-6158, (2014). DOI: 10.1021/ja412952y
12. K. ISHII, T. TAHARA, Two-dimensional fluorescence lifetime correlation spectroscopy: 1. Principle, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, 117(39), 11414-11422(2013). DOI: 10.1021/jp406861u
13. K. ISHII, T. TAHARA, Two-dimensional fluorescence lifetime correlation spectroscopy: 2. Application, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, 117(39), 11423-11432(2013). DOI: 10.1021/jp406864e

他。

[学会発表](計 373 件)

1. T. TAHARA, Femtosecond time-domain Raman spectroscopy, Symposium on "90 Years of Raman Effect: Current Status and Future Direction", Department of Inorganic and Physical Chemistry, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Feb.27-Mar. 2, 2018(Plenary).
2. T. TAHARA, Primary process of photo-responsive proteins studied by femtosecond time-domain Raman spectroscopy, DAE - BRNS Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry, Mumbai, India, Jan. 3-7, 2018 (Plenary).
3. T. TAHARA, Ultrafast dynamics at water interfaces revealed by time-resolved heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation, 6th Asian Spectroscopy Conference, Hsinchu, Taiwan, Sep.3-6, 2017 (Keynote).
4. T. TAHARA, Femtosecond Nuclear Dynamics of Photo-Induced Structural Changes of Metal Complexes, 22nd International Symposium on Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds (ISPPCC 2017), Oxford, UK, Jul. 9-14, 2017 (Plenary).
5. T. TAHARA, Femtosecond vibrational spectroscopy of simple and complex systems, 8th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (ICAVS-8), Vienna, Austria, Jul. 12-17, 2015 (Plenary).
6. T. TAHARA, Complex Molecular Systems Studied by Novel Ultrafast and Nonlinear Spectroscopy, The 4th Asian Spectroscopy Conference, Singapore, Dec. 16-18, 2013(Plenary).
7. 田原太平, My personal history with India, 4th India-Japan Symposium on Frontiers in Science & Technology: Emerging Materials for Health, Environment and Safety, Indian Embassy (東京都千代田区)2013年10月11日 (Plenary) .

他。

〔図書〕(計 5 件)

1. Satoshi Nihonyanagi, Tahei Tahara, Vibrational Sum Frequency Generation Spectroscopy. In: The Surface Science Society of Japan (eds.) Compendium of Surface and Interface Analysis, 801-807 (2018).
- 他。

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：光子検出装置、光子検出方法、蛍光相關分光測定装置、蛍光相互相關分光測定装置、動的散乱測定装置、及び、蛍光顕微鏡
 発明者：石井邦彦、田原太平
 権利者：国立研究開発法人理化学研究所
 種類：特許
 番号：PCT/JP2016/083010
 出願年月日：2016年11月8日
 国内外の別：国際

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ (日):

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

ホームページ (英):

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田原 太平 (TAHARA, Tahei)

国立研究開発法人理化学研究所・田原分子分光研究室・主任研究員

研究者番号：60217164

(2) 研究分担者

竹内 佐年 (TAKEUCHI, Satoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・田原分子分光研究室・専任研究員

研究者番号：50280582

石井 邦彦 (ISHII, Kunihiko)

国立研究開発法人理化学研究所・田原分子分光研究室・専任研究員

研究者番号：80391853

山口 祥一 (YAMAGUCHI, Shoichi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60250239

須藤 雄気 (SUDO, Yuki)

岡山大学・医歯薬学総合研究科・教授

研究者番号：10452202

(2) 連携研究者

二本柳 聡史 (NIHONYANAGI, Satoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・田原分子分光研究室・専任研究員

研究者番号：30443972

倉持 光 (KURAMOCHI, Hikaru)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：40709367