

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24245006

研究課題名(和文)新しい界面選択的超高速分光の開発と液体界面ダイナミクス研究への応用

研究課題名(英文)Development of New Interface-Selective Nonlinear Spectroscopy and Its Application to the Study of Dynamics at Liquid Interfaces

研究代表者

田原 太平 (TAHARA, Tahei)

独立行政法人理化学研究所・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) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：界面はきわめて広範な科学・技術分野で大切な役割を果たしており、その分子論的理解は本質的に重要である。液体界面での分子の超高速ダイナミクスを研究するために、フェムト秒光パルスによる光励起とわれわれが開発したヘテロダイン検出振動和周波分光法とを組み合わせ、一群の新しい界面選択的な時間分解非線形振動分光計測法を開発した。開発した新しい計測法を用いて光励起された界面水分子のフェムト～ピコ秒ダイナミクスを研究し、界面水のOH伸縮振動バンドのホールバーニングとスペクトル拡散を数100フェムト秒の時間分解能で観測することに成功するなど、水界面の基礎的分子ダイナミクスについて初めての観測を実現した。

研究成果の概要(英文)：Because interfaces play crucial roles in many phenomena that are important in a wide range of science and technology, molecular-level understanding of interfaces is highly desired. In this study, we developed new interface-selective time-resolved nonlinear vibrational spectroscopic methods, by combining the femtosecond photoexcitation and multiplex heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation technique developed by us. Using the newly developed methods, we succeeded in tracing femtosecond-picosecond dynamics at water interfaces, including the observation of hole-burning indicating inhomogeneity of hydrogen bonds of interfacial water as well as the following spectral diffusion that occurs on the time scale of a few hundred femtoseconds.

研究分野：物理化学

キーワード：界面 ダイナミクス 超高速分光 非線形分光 分子科学

1. 研究開始当初の背景

液体界面をはじめとする界面はきわめて広範な科学・技術分野で大切な役割を果たしており、その理解は本質的に重要である。しかしながら、界面に対するわれわれの分子科学的理解は、凝縮相の分子に対する理解に比べると未だ著しく遅れている。液体界面の分光学的研究においては、1980年代はじめに開始された二次的非線形分光(一般的には偶数次の非線形分光)がほとんど唯一の方法論であり、重要である。この方法は、二次的非線形分極は反転対称性のあるバルクには生じず、反転対称性が破れた界面にのみ生じるという原理に基づいたもので、本質的に界面選択的な分光法である。そして界面の振動スペクトル測定に関しては、赤外光と可視光を界面に同時に照射してその和周波強度を測定する振動和周波発生(VSFG)分光が、また、電子スペクトル測定に関しては、単色性の良い短パルスの照射によって発生する二倍波の強度を波長を変えながら測定する二倍波発生(SHG)分光が用いられてきた。しかしながら、これらの方法では通常、信号光強度をそのまま測定するホモダイン検出で測定が行われるため、二次の感受率の自乗 $|\chi^{(2)}|^2$ に対応するスペクトルしか得られない。このため従来法には信号間の干渉によるスペクトル歪み、低い感度、分子の絶対配向の情報を含む符号の喪失などの多くの本質的な問題があり、しばしば誤った結論を導いてきた。このような中、われわれは近年フェムト秒レーザー技術を最大限に利用した一群の新しい界面選択的非線形分光を開発し、界面研究における非線形分光計測の可能性を大きく広げること成功した。特に、界面選択的な振動スペクトルと電子スペクトルの測定のための和周波発生において、比較的狭帯域の ω_1 光と広帯域の赤外光あるいは白色光 ω_2 光を用いてスペクトルを一度に得るマルチプレックス測定と、発生する和周波信号光 $\omega_1+\omega_2$ を別に発生させた参照光(局部発振器, LO光)と位相を確定させながら干渉させるヘテロダイン検出を世界で初めて同時に実現することに成功した。このヘテロダイン検出和周波発生分光によって、界面分子の二次的非線形感受率 $\chi^{(2)}$ の実部($\text{Re } \chi^{(2)}$)と虚部($\text{Im } \chi^{(2)}$)のスペクトルを独立に測定できるようになった。これは、溶液等のバルクの研究で最も広く用いられる吸収スペクトル(これらは $\text{Im } \chi^{(1)}$ スペクトルに対応する)と直接比較できる電子および振動スペクトルが界面分子だけを選択して測定可能になったことを意味する。この意義はきわめて大きく、われわれの開発したこれら新しい界面選択的非線形分光法によって界面分子の定常的状态について多くの新しい知見が得られた。しかしながら、界面分子の動的挙動(ダイナミクス)に関しては当時ホモダイン検出を用いたいくつかの研究があったものの、 $|\chi^{(2)}|^2$ の時間分解スペクトルは解釈が極め

て難しく、ほとんど理解が進んでいなかった。

2. 研究の目的

(1) われわれが開発したマルチプレックスヘテロダイン検出和周波分光法と短パルスによる光励起を組み合わせ、液体界面におけるピコ~フェムト秒ダイナミクスの研究のための新しい界面選択的時間分解線形分光法を開発する。

(2) 開発した方法を用いて液体界面における超高速過程を研究し、液体界面のダイナミクスの研究を一挙に溶液研究の水準へ引き上げる。

3. 研究の方法

フェムト秒モードロックチタンサファイアレーザー、再生増幅器、および再生増幅器の出力で励起される光パラメトリック増幅器(OPA)からなるレーザーシステムを光源として製作した装置群を用いて研究を行った。いずれの実験もポンプ-プローブ法の原理に基づき、フェムト秒パルスで液体界面を励起し、これから適当な遅延時間において界面選択的な振動スペクトルをヘテロダイン振動和周波発生分光で測定することで、界面の超高速ダイナミクスを追跡した。以下に詳述する。

(1) ヘテロダイン振動和周波発生(HD-VSFG)分光計測

プローブ過程に用いるHD-VSFG測定では、チタンサファイア再生増幅器の出力を狭帯域フィルターで 24 cm^{-1} まで狭くしたものを ω_1 光として、またOPAのシグナル光とアイドラー光の差周波として発生させた広帯域赤外光を ω_2 光として用い、両者を液体試料表面に同時に集光することで和周波を発生させた。さらに試料前に設置した薄い石英板あるいは試料後に置いたGaAsの表面を利用して和周波を同軸上に発生させ、これをLO光として試料からの和周波信号を干渉させることでヘテロダイン検出を実現した。これによって二次的非線形感受率 $\chi^{(2)}$ の実部($\text{Re } \chi^{(2)}$)と虚部($\text{Im } \chi^{(2)}$)のスペクトルを得た。

(2) 赤外励起の時間分解ヘテロダイン振動和周波発生(TR-HD-VSFG)分光計測

赤外励起のTR-HD-VSFG測定においては、光学フィルター、あるいは差周波発生によってフェムト秒赤外パルスのバンド幅を適当に狭くし、これによって界面分子の振動バンドを選択的に励起した。その後の振動ダイナミクスは適当な遅延時間の後にHD-VSFGによって界面の振動スペクトルを測定することで追跡した。時間分解能は約200フェムト秒であった。

(3) 2次元赤外ヘテロダイン振動和周波発生(2D HD-VSFG)分光計測

赤外励起の TR-HD-VSFG 測定において光励起に用いる赤外光パルスの波長を変化させながら系統的に測定を行い、特定の遅延時間に測定された時間分解スペクトルのポンプ光依存性を二次元表示することで、二次元ヘテロサイン振動和周波スペクトルを得た。

(4) 紫外励起の時間分解ヘテロサイン振動和周波発生 (TR-HD-VSFG) 分光計測

液体界面の光化学ダイナミクスを追跡するために紫外励起の TR-HD-VSFG 測定を行った。これも世界初めての試みである。この実験においては、チタンサファイア再生増幅器の三倍波 (267nm) をポンプ光として用い、光励起後の界面におけるダイナミクスを HD-VSFG によって追跡した。

4. 研究成果

(1) 赤外励起 TR-HD-VSFG 分光の開発

赤外ポンプ光を照射して界面分子の振動励起を行い、適当な遅延時間後に HD-VSFG 測定を行うことで、水界面での振動緩和ダイナミクスを追跡することに成功した。これは $1\text{m}\chi^{(1)}$ スペクトルによる水界面の時間分解測定としては世界初めてのものである。具体的には帯電した水界面のモデルである電荷をもったヘッドグループを有する界面活性剤 CTAB 単分子膜と水の界面に対して TR-HD-VSFG 実験を行った。界面水に由来する OH 伸縮振動バンドを 3400 cm^{-1} の赤外フェムト秒パルスで振動励起し、その後の OH 伸縮振動領域の時間分解振動スペクトルを約 200 フェムト秒の時間分解能で測定した。振動励起に伴って界面水の振動基底状態の信号が減少し (ブリーチ信号の観測)、同時に振動励起状態の信号が現れる様子が観測された。観測された H_2O 界面のブリーチ信号は励起直後から幅が広く、界面の H_2O の OH 伸縮振動はフェルミ共鳴によって広がっていることが示唆された。

(2) 赤外励起 TR-HD-VSFG 分光の二次元分光への拡張

TR-HD-VSFG で、OH 伸縮バンドをその幅より狭い帯域の赤外パルスで励起することで水界面の水素結合の不均一性を実験的に調べることができる。 H_2O を D_2O で希釈し、OH 伸縮振動を与える種が実質的に HOD となる状況を作り出せるが、こうすると HOD ではフェルミ共鳴による広がりがないので、界面水構造の不均一性をより直接的に検討できる。CTAB の単分子膜と水の界面において、このような同位体希釈条件で TR-HD-VSFG 実験を行い、水素結合の不均一性を示すホールバーニングと、それに続くスペクトル拡散現象を観測することに成功した。さらに赤外励起光の励起波長を系統的に変化させた測定を行い、TR-HD-VSFG 測定を二次元振動分光 (2D HD-VSFG) に拡張した。2D HD-VSFG はバルクにおける最先端の超高速赤外分光である 2D

-IR と直接対応する界面分光である。したがって、これにより溶液の最先端の分光計測と同等の実験が空気/液体界面において実現可能であることが示された。また得られた二次元スペクトルは界面の水素結合ダイナミクスがバルクとは顕著に異なっていることを示唆した。

(3) 2D HD-VSFG による空気/水界面の振動ダイナミクスの観測

開発した 2D-HD-VSFG 分光を空気/水界面に適用して、水表面の水素結合ネットワークのフェムト秒振動ダイナミクスを研究した。空気/水界面の OH 伸縮領域の定常スペクトルには、空気側に突き出たフリーな OH 基によるシャープな正のバンド、H をバルク側に向けて水素結合した水分子による負のバンドなど、界面で異なる水素結合状況下にある OH 基の振動バンドが観測されるが、2D-VSFG スペクトルにもこれらに対応する対角ピークが確認された。また、水素結合した OH の負のバンドに対応する二次元スペクトルのピークが対角線方向にわずかに伸張していることが観測され、このバンドが水素結合の不均一性によって広がっていることがわかった。この対角線方向の伸張は数百フェムト秒以内に消失し、水の表面できわめて高速で進行するスペクトル拡散が観測された。また、遅延時間 0 においても異なる OH 伸縮振動間の非対角ピークが観測された。これは振動の非調和性あるいは時間分解能 (200 fs) 以内で起こるエネルギー移動によって、これらの OH 伸縮振動が強く結合していることを示している。

(4) MD シミュレーションによる空気/水界面の 2D HD-VSFG の理解

分担者である富山大の石山講師 (分担者) と東北大の森田教授が中心となって空気/水界面の 2D HD-VSFG スペクトルの MD シミュレーションを行い、実験で得られたスペクトルと比較した。これによって実験で観測された水素結合 OH とフリー OH のクロスピークは主として非調和結合によるものであると結論された。

(5) 帯電した水界面のモデル系である、正に帯電した界面活性剤 CTAB と水の界面の 2D-HD-VSFG 測定を H_2O と HOD について全 OH 伸縮振動領域で行って比較し、この正に帯電した水界面の振動ダイナミクスの全貌を明らかにした。OH 伸縮振動バンドが主として HOD に由来するようにした CTAB/HOD 界面では、OH 伸縮振動励起直後にポンプ波長とともにブリーチ波長が変化する、いわゆる対角線上にブリーチ信号が伸びた二次元スペクトルが観測され、さらにこれが約 0.3 ピコ秒でスペクトル拡散する様子が確認された。一方 CTAB/ H_2O 界面では励起直後に定常スペクトルに認められる 3230 cm^{-1} と 3420 cm^{-1} の対応

するブリーチピークとそれらの間のクロスピークが観測された。シミュレーションによって、この複雑な CTAB/H₂O 界面の 2D スペクトルが界面水の不均一性とフェルミ共鳴で説明できることを示した。

(6) 正に帯電した界面活性剤 CTAB の単分子膜と水の界面において、過剰量のアルカリハライド塩を付加することで電気二重層が圧縮し、CTAB/H₂O 界面の界面最近傍の水のみの信号を検出する定常および時間分解 HD-VSFG 測定を行った。得られた定常振動スペクトル、および時間分解振動スペクトルの解析から、界面近傍においては Cl⁻、Br⁻ イオンは強く水分子と相互作用しており、そのため界面最近傍の水分子ではフェルミ共鳴が抑制されていることが分かった。

(7) 赤外光励起による界面水分子の振動ダイナミクスの研究を進めながら、液体界面の溶質分子を紫外光で電子励起して光化学過程を開始させ、その後のダイナミクスを HD-VSFG で追跡する紫外励起 TR-HD-VSFG 分光を開発した。これを用いて実験を行い、空気/水界面で、水あるいは溶質分子のイオン化によって電子を生成させると、OH 伸縮振動領域に強い過渡信号が現れることを見いだした。これを表面に過渡的に生成する電子に溶媒和した界面水分子の信号に帰属した。

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 13 件)

1. Ken-ichi INOUE, Satoshi NIHONYANAGI, Prashant C. Singh, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei TAHARA, 2D heterodyne-detected sum frequency generation study on the ultrafast vibrational dynamics of H₂O and HOD water at charge interfaces, J. Chem. Phys., 査読有, Vol. 142, 2015, 212431 DOI: 10.1063/1.4918644
2. Tatsuya ISHIYAMA, Akihiro MORITA, Tahei TAHARA, Molecular dynamics study of two-dimensional sum frequency generation spectra at vapor/water interface, J. Chem. Phys., 査読有, 142 巻, 2015, 212407 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4914299>
3. 井上賢一、Prashant C. Singh、二本柳聡史、山口祥一、田原太平、時間分解ヘテロダイナミクス検出振動和周波発生分光法を用いた水界面の超高速振動ダイナミクスの研究、表面科学、査読有、35 巻、662-667、2014、 DOI: <http://dx.doi.org/10.1380/jsssj.35.662>
4. 二本柳聡史、山口祥一、田原太平、ヘテロダイナミクス検出和周波発生分光法による水界面における水素結合構造とダイナミクスの解明、Electrochemistry、査読有、82 巻、2014、766-770 DOI: 10.5796/electrochemistry.82.766
5. Prashant C. SINGH, Satoshi NIHONYANAGI, Shoichi YAMAGUCHI and Tahei TAHARA, Interfacial water in the vicinity of a positively charged interface studied by steady-state and time-resolved heterodyne-detected vibrational sum frequency generation, J. Chem. Phys., 査読有, 141 巻, 2014, 18C527 DOI: 10.1063/1.4897265
6. 二本柳聡史、Prashant C. Singh、山口祥一、田原太平、定常および時間分解ヘテロダイナミクス検出和周波発生分光法の開発と界面水への応用、分光研究、査読有、62(6)巻、2013、253-263 DOI: なし
7. Satoshi NIHONYANAGI, Jahur A. MONDAL, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei TAHARA, Structure and dynamics of interfacial water studied by heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation, Annual Review of Physical Chemistry, 査読有, 64 巻, 2013, 579-603 DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-physchem-040412-110138>
8. Prashant Chandra SINGH, Satoshi NIHONYANAGI, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei TAHARA, Ultrafast vibrational dynamics of hydrogen bond network terminated at the air/water interface: A two dimensional heterodyne-detected vibrational sum frequency generation study, J. Chem. Phys., 査読有, 139 巻, 2013, 161101- 161104 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4826095>
9. Kazuya SHIRATORI, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei TAHARA, and Akihiro MORITA, Computational analysis of the quadrupole contribution in the second-harmonic generation spectroscopy for the water/vapor interface, J. Chem. Phys., 査読有, 138 巻, 2013, 064704-064711 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4790407>
10. Satoshi NIHONYANAGI, Prashant Chandra SINGH, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei Tahara, Two-Dimensional Heterodyne-Detected VSFG Spectroscopy of Water Molecules at Charged Interfaces, EPJ Web of Conferences, 査読有, 41 巻, 5022, 2013 DOI: 10.1051/epjconf/2013410502

11. Shoichi YAMAGUCHI, Achintya KUNDU, Pratik SEN and Tahei TAHARA, Quantitative estimate of the water surface pH using heterodyne-detected electronic sum frequency generation, J. Chem. Phys., 査読有, 137巻, 151101/1-4, 2012, DOI: 10.1063/1.4758805
 12. Prashant Chandra SINGH, Satoshi NIHONYANAGI, Shoichi YAMAGUCHI and Tahei TAHARA, Ultrafast vibrational dynamics of water at a charged interface revealed by two-dimensional heterodyne-detected vibrational sum frequency generation, J. Chem. Phys., 査読有, 137巻, 9, 094706/1-6, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4747828>
 13. Satoshi NIHONYANAGI, P.C.SINGH, Shoichi YAMAGUCHI and Tahei TAHARA, Ultrafast vibrational dynamics of a charged aqueous interface by femtosecond time-resolved heterodyne-detected vibrational sum frequency generation, Bull. Chem. Soc. Jpn., 査読有, 85巻, 7, 758-760, 2012, DOI: 10.1246/bcsj.20120051
- [学会発表](計 63 件)
1. Tahei TAHARA, Water interfaces studied by steady-state and time-resolved heterodyne detected vibrational sum-frequency generation, Sum Frequency Spectroscopy, Wilhelm-Kempf-Haus, Wiesbaden Naurod, Germany, March 30-April 1, 2015 (Invited).
 2. 田原太平、見えないものを観る：新しい分光計測による複雑分子系ダイナミクスの観測と理解、第5回統合物質シンポジウム、名古屋大学野依記念物質科学研究館(愛知県名古屋市)、2014年12月19日~20日、(Invited)
 3. 田原太平、新しい界面選択的非線形分光の開発と展開、第8回分子科学討論会、広島大学東広島キャンパス(広島県東広島市)、2014年9月21日~24日、(Invited)
 4. Tahei TAHARA, Ultrafast vibrational spectroscopy at liquid interfaces by heterodyne-detected sum-frequency generation, 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, Okinawa, Japan, July 7-11, 2014 (Invited)
 5. Shoichi YAMAGUCHI, Heterodyne-detected SFG spectroscopy for liquid interfaces, Symposium on Molecular Science and Synthesis of Functional Molecules for Next Generation, Hiroshima, Japan, March 10-11, 2014 (Invited).
 6. 二本柳聡史、Prashant Chandra Singh、山口祥一、田原太平、先端的非線形分光法の開発と水界面の分子科学、2013年度日本分光学会北海道支部シンポジウム、北海道大学(北海道札幌市)2014年1月24日、(Invited)
 7. Tahei TAHARA, Electronic/vibrational heterodyne-detected sum-frequency generation and its extension to ultrafast 2D spectroscopy at liquid interfaces, Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP) - 2014, Mumbai, India (January 6-9, 2014), (Invited)
 8. Tahei TAHARA, Complex molecular systems studied by novel ultrafast and nonlinear spectroscopy, The 4th Asian Spectroscopy Conference, Nanyang, Singapore, December 16-18, 2013 (Invited)
 9. Tahei TAHARA, Seeing the unseen with ultrashort optical pulses, Department Seminar, Victoria, Canada, November 7, 2013, (Invited)
 10. Tahei TAHARA, Structure and dynamics of water interfaces studied by novel interface-selective nonlinear spectroscopy, AMO Seminar, Vancouver, Canada, November 5, 2013, (Invited)
 11. Tahei TAHARA, Seeing the unseen with ultrashort optical pulses, Department Seminar, Edmonton, Canada, November 4, 2013, (Invited)
 12. Tahei TAHARA, Structure and dynamics of water interfaces revealed by heterodyne detected sum-frequency generation, International Symposium for the 70th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan, Sendai, Japan, September 28-30, 2013, (Invited)
 13. Tahei TAHARA, Seeing the unseen to unveil fundamental molecular processes, IBS Symposium on 'Present status and future perspective of photo-science', Seoul, Korea, March 19, 2013, (Invited)
 14. Tahei TAHARA, New insights into water interfaces obtained by heterodyne sum-frequency generation, International Symposium on Molecular Organization and Complexity: A Chemical Perspective, Kolkata, India, February 6-8, 2013, (Invited)
 15. Tahei TAHARA, Ultrafast nonlinear spectroscopy at water interfaces, Royal Society of Chemistry India Roadshow, Kolkata, India, February

- 5,2013, (Invited)
16. Tahei TAHARA, Heterodyned multiplex sum-frequency generation and its extension to time-resolved measurements for water interfaces, Workshop on Structure and Dynamics of Water in Gas, Liquid and Solid Phases, Institute of Atomic and Molecular Sciences, Taipei, Taiwan, November 28-30, 2012, (Invited)
 17. Tahei TAHARA, New insight into water interfaces obtained by steady-state and time-resolved heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation, Symposium on Recent Advances in studies of molecular processes at liquid interfaces, 224th ACS National Meeting & Exposition, Pennsylvania, USA, August 19-23, 2012, (Invited)
 18. Shoichi YAMAGUCHI, Achintya KUNDU, Pratik SEN and Tahei TAHARA, pH of the Water Surface Evaluated by Heterodyne-Detected Electronic Sum Frequency Generation, The 23rd International Conference on Raman Spectroscopy, Bangalore, India, August 12-17, 2012, (Invited)
 19. Prashant Chandra SINGH, Satoshi NIHONYANAGI, Shoichi YAMAGUCHI, and Tahei TAHARA, Two-dimensional heterodyne-detected vibrational sum-frequency generation to reveal femtosecond dynamics of water at charged interfaces, The 23rd International Conference on Raman Spectroscopy, Bangalore, India, August 12-17, 2012, (Invited)
 20. Tahei TAHARA, Heterodyned nonlinear electronic spectroscopy at liquid interfaces, Gordon Research Conference on Electronic Spectroscopy and Dynamics, ME, USA, July 22-27, 2012, (Invited)
 21. Tahei TAHARA, Seeing interfaces with ultrashort light, NCTU Student Summer School, Hsinchu, Taiwan, July 6-7, 2012, (Invited)
 22. Tahei TAHARA, New insights into structure and dynamics of water interfaces obtained by phase-sensitive heterodyne detection of vibrational sum-frequency generation, The Second Hsinchu Symposium on Advanced Spectroscopy and Imaging in Molecular Science, Hsinchu, Taiwan, July 5-6, 2012, (Invited)
 23. 田原太平、フェムト秒の光で分子を観る、日本化学会関東支部群馬地区講演会、群馬大学(群馬県桐生市) 2012年7月3日、(Invited)

24. Tahei TAHARA, Structure and Dynamics of Water at Charged Aqueous Interfaces Studied by HD-VSFG, Telluride Workshop on Nonlinear Workshop at Interfaces, Colorado, USA, June 17-21, 2012, (Invited)
25. 山口 祥一、Nonlinear Laser Spectroscopy for Surfaces and Interfaces of Liquids、CAS-RIKEN Frontier Science Workshop 2012、大磯町、日本、2012年5月26日、(Invited) 他。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://ai.is.noda.tus.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田原 太平 (TAHARA, Tahei)
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(～25年度)

山口 祥一 (YAMAGUCHI, Shoichi)
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：60250239

(3) 研究分担者(26年度)

石山 達也 (ISHIYAMA, Tatsuya)
富山大学・大学院理工学研究部(工学)・
講師
研究者番号：10421364