

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24年 6月 5日現在

機関番号：12601

研究種目：特別推進研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19002006

研究課題名（和文） 超高速水素マイグレーション

研究課題名（英文） Ultrafast hydrogen migration

研究代表者

山内 薫 (YAMANOUCHI KAORU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：40182597

研究成果の概要（和文）：

先端的超短パルスレーザー光源を用いたコインシデンス運動量画像法によって、強光子場下で進行する超高速水素マイグレーションの機構を明らかにした。また、超高速の水素移動も追跡できる高い時間分解能を持つ電子回折法を提案し、超短パルスレーザーによる光電場内散乱信号を初めて観測することによって、提案した手法が実現可能であることを示した。さらに、水素マイグレーション過程を理論的に取り扱うために、電子とプロトンから成る系の粒子間相関ダイナミクスを記述できる量子動力学理論を新たに構築した。

研究成果の概要（英文）：

Dynamics of ultrafast hydrogen migration in intense laser fields was elucidated by a coincidence momentum imaging method with an advanced ultrashort pulsed laser system. A new time-resolved electron diffraction method for tracing ultrafast hydrogen motions was proposed, and electron scattering signals induced by ultrashort pulsed laser fields were observed for the first time, showing the feasibility of the proposed method. Furthermore, quantum dynamics theory for the correlated dynamics of a system consisting of electrons and protons was newly constructed for describing the ultrafast hydrogen migration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	108,200,000	32,460,000	140,660,000
2008年度	131,200,000	39,360,000	170,560,000
2009年度	95,100,000	28,530,000	123,630,000
2010年度	79,400,000	23,820,000	103,220,000
2011年度	52,400,000	15,720,000	68,120,000
総計	466,300,000	139,890,000	606,190,000

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：水素移動・強光子場・超高速化学・化学反応動力学

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らによる最近の研究から、強レーザー光子場中において、多原子分子の分子内の水素原子の集団が超高速で動き回ること、そして、その後、 H_3^+ や H_2^+ として放出される場合があることが明らかになった。こ

の現象が多くの炭化水素分子に普遍的に見られるものであることも我々のグループによって確認されており、国内外で「強光子場下での超高速水素マイグレーション」に関心が寄せられていた。特に、強光子場パルスの、強度、波形、波長、偏光、位相によって、水

素移動過程が鋭敏に応答すると予想されるため、強光子場を最適化すれば、分子内の水素原子を自在に、かつ瞬時に移動させることが可能となり、新しい形の化学反応制御が達成されると期待されていた。

また、「断熱近似」の概念に立脚した既存の電子状態理論では、分子内を超高速で動き回る水素原子を考慮することができない。この超高速水素マイグレーションを理解するためには、プロトンの運動と電子の運動の両者を分離することなく同時に取り扱うことのできる「断熱近似を超えた」全く新しい電子-プロトン動力学理論の枠組みの構築が急務であった。

2. 研究の目的

本研究では、「コインシデンス運動量画像法」、「光電場内電子散乱法」を用いた水素マイグレーションの実時間追跡、および「時間依存多配置波動関数理論による水素マイグレーションの記述」を通じて、「強光子場中における超高速水素マイグレーションの本質」を解明する。本特別推進研究では、以下の3つの目標に向かってプロジェクトを推進する。

(1) 水素マイグレーションの実時間追跡

搬送波包絡線位相(CEP)を固定した高輝度数サイクルパルス光源を開発し、強光子場下における水素マイグレーション過程を時間分解能 5 fs で「コインシデンス運動量画像法」、「光電場内電子散乱法」により追跡する。

(2) 水素マイグレーションの記述のための新しい量子動力学理論の開発

電子とプロトンから成る系の異種粒子間相関ダイナミクスを記述できる量子動力学理論を新たに構築する。計算コードの開発を行い、数値計算により水素マイグレーションを解析する。

(3) 水素マイグレーション機構の解明と反応制御への応用

目標(1)と目標(2)の成果に基づいて、強光子場下で進行する超高速水素マイグレーションの機構を明らかにする。さらに、パルス波形を制御することによって、分子内および分子クラスター内の水素マイグレーションの制御を行う。

3. 研究の方法

本研究の項目は、(1) 高強度数サイクルパルス発生とアト秒パルス発生、(2) コインシデンス運動量画像法による炭化水素分子中の分子内水素マイグレーション過程の追跡、(3) 水素マイグレーションの超高速時間分解電子回折測定、および、(4) 水素マイグレーションの記述のための新しい電子動力学理論の開発、の4つに分けられる。

(1) 高強度数サイクルパルス発生とアト秒パ

ルス発生

先端レーザーシステムの構築のため、高輝度搬送波位相制御高繰り返しフェムト秒レーザーシステムを設置し、CEP を固定した実験を可能にする。さらに、CEP 制御パルスとアト秒パルスを用いた水素マイグレーション過程のポンプ・プローブ計測のために、CEP 制御数サイクルパルスを用いて単一のアト秒パルスを発生する。

(2) コインシデンス運動量画像法による炭化水素分子中の分子内水素マイグレーション過程の追跡

強光子場中における水素マイグレーションの波長依存性およびパルス幅依存性を調べる。また、コインシデンス運動量画像計測装置に検出面の径が従来型の 1.5 倍の位置敏感型検出器を設置し、運動量解像度の向上を図る。さらに、光電子に関しても同時計測を実現するとともに、イオン・電子光学系の電極を改良し、運動量測定の高分解能化を達成する。

CEP 制御数サイクルパルスおよび単一アト秒パルスを光源として使い、水素マイグレーション過程のポンプ・プローブ追跡を行う。計測装置としては、飛行時間型質量分析装置および光電子光イオン同時計測装置を用いる。

メタノール分子やメチルアセチレン分子などの炭化水素分子において、水素マイグレーション過程における CEP の効果を明らかにする。このとき、並行して、単一パルス CEP 測定装置を用いることによって、パルス毎の CEP を高精度で測定する。

(3) 水素マイグレーションの超高速時間分解電子回折測定

強光子場下の分子による電子散乱現象を利用した超高速時間分解電子回折法の装置開発を行い、装置性能評価のためのテスト実験を行う。

開発した観測装置を用いて、希ガス原子を試料とした光電場内電子散乱信号の観測を行う。さらに、光電場内電子散乱信号の散乱角度分布の観測を行う。次に、分子を試料として、光電場内電子散乱信号の角度分布に電子回折像が現れることを実験的に示し、回折像から分子構造を決定する。

炭化水素分子を試料として、光電場内電子回折実験を行う。C-H や O-H 原子対に対応する干渉パターンの解析から水素原子の分布が分子内に如何に広がり、非局在化しているかを調べる。

(4) 水素マイグレーションの記述のための新しい量子動力学理論の開発

フェルミオンとしての電子とプロトンの状態をスレーター行列式関数の積和として扱う時間依存多配置波動関数理論を構築する。波動関数の構成要素となる展開係数 (CI 係

数)、軌道関数に対する運動方程式の導出は、時間依存の変分原理を用いて行う。

数値計算コードを作成し、先ず、炭化水素分子の基底電子-プロトン状態のエネルギー期待値、分子内官能基の位置相関を計算する。これら基底状態に関する計算結果を既存の量子化学計算の構造最適化計算から求められる値と比較し、本研究で提案する新規理論の物理的な妥当性を示す。

計算で求められた、基底電子-プロトン状態を初期値として、レーザー電場との相互作用を考慮した動力学計算を実行し、時間に依存した電子-プロトン波動関数を求める。求められた波動関数を解析することで超高速水素マイグレーションにおけるプロトンと電子ダイナミクスとの相関を定量化する。

プロトン分布関数の時間変化を、特に波動関数の観点から詳しく解析し、プロトンの量子性が超高速水素マイグレーションのどのような特徴として発現しているのかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 高強度数サイクルパルス発生とアト秒パルス発生

① 高繰り返し CEP 制御フェムト秒レーザーシステムの開発

高輝度高繰り返しフェムト秒レーザーシステム (5 kHz, 30 fs, 6 mJ) の開発およびその CEP の制御を行った。発振器については、音響光学変調器によるポンプ光強度変調による CEP 制御に加えて、キャビティー内のウェッジ厚みの制御を行うことによって、30 時間以上の CEP 制御が可能となった。また、増幅段の CEP 制御については、振動源を低減することによって、2 時間以上 200 mrad 以下の位相揺らぎで CEP の制御を行うことが可能となった。

② 高強度数サイクルパルス発生

①で開発を行った高強度高繰り返し CEP 制御レーザー光を差動排気中空ファイバーパルス圧縮装置に入射することによって、最大 2 mJ, 5 fs の高強度数サイクルパルスの発生が可能となった。数サイクルパルスの CEP 制御が実現できていることをパルス毎の CEP 測定装置を用いて確認を行った。ビームポインティング安定化装置および音響光学フィルターを導入し、出力の安定化を達成した。

③ 数サイクルパルスを用いた高次高調波発生

②で開発を行った高強度数サイクルパルスを用いて、単一アト秒パルスを発生するために必要な高次高調波の発生を行った。ネオンガスセルに数サイクルパルス光を集光照射することによって、約 13 nm までの高次高調波の発生を確認した。Mo/Si の多層膜ミラ

ーを用いて、カットオフ領域の高次高調波を選択することによって、単一アト秒パルスの発生が可能な状況にある。

④ アト秒パルスを用いたポンプ・プローブ計測が可能な光電子光イオンコインシデンス運動量画像法計測装置の製作

アト秒パルス (高次高調波) と基本波でのポンプ・プローブ計測が可能である光電子光イオンコインシデンス運動量画像計測装置の製作を行った。空間分割フィルターを用いることによって、高次高調波発生チェンバーと光電子光イオンコインシデンス運動量画像計測装置の隔離を行うことが可能なシステムとなっており、高次高調波発生時も 10^8 Pa 台の超高真空保持が可能な装置である。

(2) コインシデンス運動量画像法による炭化水素分子中の分子内水素マイグレーション過程の追跡

① アレン分子の変形と選択的結合解離過程

強光子場中のアレン分子では、水素移動が炭素骨格の変形を誘起すること、および、結合解離過程を決定づけることが明らかとなった。

② ブタジエン分子の二重水素移動

ブタジエン分子においては、C-C 結合の解離前に 2 つ水素原子が移動する解離過程の存在が確認された。

③ メチルアセチレン分子における水素の非局在化

メチルアセチレン分子では、最大 3 つの分子内の水素原子の移動を伴う解離過程が確認された。3 体解離過程について、プロトン (重水素イオン) の残り 2 つのフラグメントイオンに対する位置をプロトンマップとして構築し、クーロン爆発直前のプロトンの分布が分子骨格全体に大きく広がっていることを確認した。

④ メタノール分子における二段階の超高速水素マイグレーション

メタノール分子について水素マイグレーション

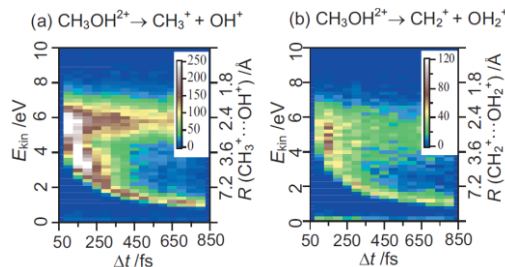


図 1. (a) $\text{CH}_3\text{OH}^{2+} \rightarrow \text{CH}_3^+ + \text{OH}^+$ と (b) $\text{CH}_3\text{OH}^{2+} \rightarrow \text{CH}_2^+ + \text{OH}_2^+$ に対する信号収率の運動エネルギー放出量 (E_{kin}) とポンプ - プローブ遅延時間 (Δt) に対する二次元プロット。上部と下部の帯状構造はそれぞれ、レーザー電場内で誘起される水素マイグレーション過程、レーザー電場が去ってから十分な時間を経て進行する水素マイグレーション過程に由来する。

シオン過程のポンプ・プローブ計測およびレーザーパラメーター（パルス幅、集光強度、偏光）依存性を調べた。その結果、ポンプ・プローブ計測からは、レーザー電場内で誘起される水素マイグレーション過程に加えて、レーザー電場が去ってから十分な時間が経ってから起こる水素マイグレーション過程の存在が明らかとなった（図1）。一方、レーザーパラメーター依存性からは、パルス幅が長い場合、レーザー場強度が低い場合、および円偏光の場合の方が、それぞれ、パルス幅が短い場合、レーザー場強度が高い場合および直線偏光の場合と比べて、水素マイグレーションを伴う解離過程の割合が多くなることが明らかとなった。

⑤ エタン分子の水素スクランプリング

部分的に重水素置換されたエタン分子（ CH_3CD_3 ）からの2体クーロン爆発によって H_3^+ またはその重水素化体を生成する過程において、それらの収率比と放出イオンのレーザー変更に対する運動量異方性から、比較的長寿命の二価イオン前駆体において、水素マイグレーションが極めて高効率で誘起され、水素と重水素との統計的な交換を経てクーロン爆発が起こることが示された。

これら①～⑤の成果から、炭素骨格の変形や結合解離過程の選択性が水素マイグレーションと密接に関連することが明らかとなり、水素マイグレーションとレーザーパラメーター依存性も見出された。これらの知見は化学反応制御への展開に資するものと考えられる。また、水素原子の分布を導き出す解析手法の開発によって、水素原子の非局在化の程度も解明できるようになった。さらに、水素マイグレーション過程には、レーザー電場内で誘起される過程とレーザー照射後に十分な時間を経て進行する過程の二種類が存在することが明らかとなった。

今後は、数サイクルパルスを用いることによって、水素マイグレーション過程におけるCEPの効果を明らかにするとともに、単一アト秒パルスを用いたポンプ・プローブ計測によって水素原子の移動過程の実時間観測も可能になると考えられる。

(3) 水素マイグレーションの超高速時間分解電子回折測定

① 光電場内電子散乱観測装置の開発

光電場内電子散乱法実現のために光電陰極型超短パルス電子銃の開発などの装置改良を重ね、光電場内電子散乱信号の観測が可能となる水準まで装置性能を向上させることに成功した（図2）。

② 光電場内電子散乱信号の観測

開発した装置を用いて、Xeガスを試料とした光電場内電子散乱実験を行い、入射エネルギーから1光子エネルギーだけ吸収・放出した

散乱電子信号の観測に成功した。この信号はレーザーパルスと電子パルスのタイミングを外すと消失し、レーザー偏光に対しても大きな依存性を持つことが示された。光電場内電子散乱信号の数値シミュレーションを行った結果、実験結果が良く再現され、観測された信号は光電場内電子散乱過程に由来することが分かった（図3）。さらに、1光子エネルギーだけ吸収・放出した散乱電子信号についての散乱角度分布の観測にも成功し、数値シミュレーションの結果とも良い一致を示した。

これまでの光電場内電子散乱実験では、パルス幅がマイクロ秒オーダーのパルス CO_2 レーザーやcw- CO_2 レーザーが用いられており、本研究は超短パルスレーザーによる光電場内電子散乱実験の初めての成功例となる。この結果は、我々が提唱する超高速電子回折法が実現可能であることを示す重要な成果といえる。また、これまでの実験では中赤外域の比較的温和な光強度（ $10.8\ \mu\text{m}$, $< 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ ）で行われ、原子とレーザー場との相互作用は無視することができた。一方、本実験は近赤外域の高強度レーザー場（ $800\ \text{nm}$, $> 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ ）を用いており、ターゲット原子はレーザー場との強い相互作用によってドレスト状態を形成していると考えられる。このような状況での散乱過程は、理論的には古くから多くの研究が行われてきたが、実験的な研究は皆無であり、本実験はドレスト原子とドレスト電子線との初めての散乱実験として

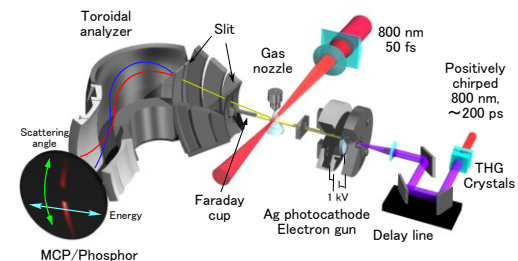


図2. 光電場内電子散乱観測装置の概略図。

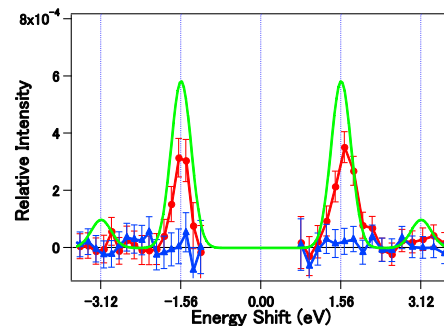


図3. 背景信号を差し引いて得られた散乱電子のエネルギースペクトル。赤●印：縦偏光照射、青▲印：横偏光照射、緑実線：縦偏光照射についての数値シミュレーション。

も位置付けられる。

今後は、分子試料を用いて超高速電子回折法を実現し、水素マイグレーションの超高速時間分解電子回折測定へと展開していく。

(4) 水素マイグレーションの記述のための新しい量子力学理論の開発

① 電子-プロトンダイナミクスを記述できる時間依存多配置波動関数理論の構築

従来の「断熱近似」とは異なる仕方では波動関数を展開することによって、電子-プロトン力学を記述できる新しい理論的枠組みの構築に成功した。この多成分系に対する時間依存多配置波動関数理論では、電子構造、プロトン構造が配置間相互作用を通して互いに規定し合っているために、電子構造がプロトン座標に陽には依存しない。従って、プロトン運動の自由度が大きな分子系であっても、第一原理的な量子力学計算が可能となる。

② メタノール分子におけるプロトン構造

構築された理論に基づいて数値計算のための計算コードを新たに開発した。本研究で提案する新規理論の物理的な妥当性を示す目的で、メタノール分子の基底電子-プロトン状態波動関数を求めた。具体的には、波動関数の記述に必要な CI 係数と電子、およびプロトン軌道関数を数値的虚時間発展の方法で決定した。エネルギー期待値は既存の量子化学計算の構造最適化計算から求められる値と良く一致した。また、断熱近似に基づく構造最適化計算で得られるメチル基と水酸基を構成しているプロトン間の相対配置とメチル基内でのプロトンの相対配置が、プロトン構造に対する条件付き確率密度関数によって適切に表現されていることが分かった (図 4)。従って、本手法の物理的な妥当性を具体的な数値計算によって示したことになる。このことは、本研究で提唱する多成分系に対する時間依存多配置波動関数理論の有用性を示す重要な成果といえる。

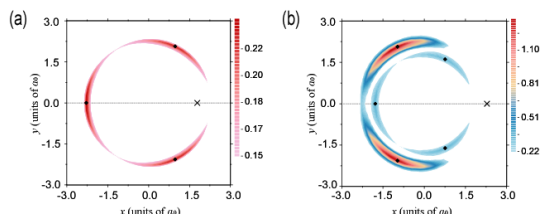


図 4. 多成分系に対する時間依存多配置波動関数理論から求められたメタノール分子のプロトンの位置相関。(a)水酸基側の 1 つのプロトンを (b)メチル基側の 1 つのプロトン位置を固定 (×印) した場合のプロトンに対する条件付き分布関数の C-O 軸方向への射影を 2 次元プロットした。黒丸は分布関数のピーク位置を示す。官能基同士の分子内配向が相対的に固定化されており、各プロトンの位置が局在化している。

レーザー場を考慮した波動関数の実時間発展は基底電子-プロトン状態波動関数を初期条件とすることで計算できる。今後は、時間依存の波動関数の計算とプロトン分布関数の時間変化の解析を行っていく予定である。

強光子場と相互作用する炭化水素分子におけるプロトンと電子ダイナミクスとの相関運動の重要性は、強レーザー場と相互作用する炭化水素分子からの高い運動エネルギーを持ったプロトンの放出過程においても着目されはじめている。最近の我々の実験的・理論的な研究によって、高い運動エネルギーを持ったプロトンの放出と分子内超高速水素マイグレーションは「増強イオン化過程」を仲立ちとして密接な関係にあることが分かってきた。しかし、プロトン運動の自由度が大きな分子系の量子ダイナミクスを第一原理的な計算から解析した例はなく、本手法の適用することで、プロトンと電子ダイナミクスの相関によって誘起される現象の深い理解に資するものと考えられる。

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 32 件)

① T. Okino, A. Watanabe, H. Xu, K. Yamanouchi, “Ultrafast hydrogen scrambling in methylacetylene and methyl-d₃-acetylene ions induced by intense laser fields”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, in press. 査読有

② R. Kanya, T. Kudou, N. Schirmel, S. Miura, K.-M. Weitzel, K. Hoshina, K. Yamanouchi, “Hydrogen scrambling in ethane induced by intense laser fields: Statistical analysis of coincidence events”, *J. Chem. Phys.*, **136**, 204309 (2012). 査読有
DOI: 10.1063/1.4720503

③ T. Kato, K. Yamanouchi, “Protonic structure of CH₃OH described by electroprotonic wave functions”, *Phys. Rev. A* **85**, 034504 (2012). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.034504

④ R. Kanya, Y. Morimoto, K. Yamanouchi, “Apparatus for laser-assisted electron scattering in femtosecond intense laser fields”, *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 123105 (2011). 査読有
DOI: 10.1063/1.3665926

⑤ H. Xu, T. Okino, K. Yamanouchi, “Ultrafast delocalization of hydrogen atoms in allene in intense laser fields”, *Appl. Phys. A*, **104**, 941-945 (2011). 査読有
DOI: 10.1007/s00339-011-6444-7

⑥ R. Kanya, Y. Morimoto, K. Yamanouchi, “Observation of laser-assisted electron-atom scattering in femtosecond intense laser fields”,

Phys. Rev. Lett., **105**, 123202 (2010). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.123202

⑦ H. Xu, T. Okino, K. Nakai, K. Yamanouchi, S. Roither, X. Xie, D. Kartashov, L. Zhang, A. Baltuska, M. Kitzler, “Two-proton migration in 1,3-butadiene in intense laser fields”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12**, 12939 (2010). 査読有
DOI: 10.1039/C0CP00628A

⑧ H. Xu, C. Marceau, K. Nakai, T. Okino, S.L. Chin, K. Yamanouchi, “Two stages of ultrafast hydrogen migration in methanol driven by intense laser fields”, *J. Chem. Phys.*, **133**, 071103 (2010). 査読有
DOI: 10.1063/1.3473931

⑨ T. Kato, K. Yamanouchi, “Time-dependent multiconfiguration theory for describing molecular dynamics in diatomic-like molecules”, *J. Chem. Phys.*, **131**, 164118 (2009). 査読有
DOI: 10.1063/1.3249967

他 23 件

[学会発表] (計 161 件)

① K. Yamanouchi, “Ultrafast probing of molecules in intense laser fields by coincidence momentum imaging and gas electron diffraction,” XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Queen's University Belfast, Belfast, Northern Ireland, UK, Jul. 27 (2011).

② K. Yamanouchi, “Ultrafast hydrogen migration in intense laser fields studied by coincidence momentum imaging and gas electron diffraction,” The Madrid Conference on Femtochemistry (FEMTO10), Madrid, Spain, Jul. 14 (2011).

③ K. Yamanouchi, “New approaches to investigating ultrafast hydrogen migration in hydrocarbon molecules in intense laser fields: Momentum imaging and gas electron diffraction, International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 9 (ISUILS9), Maui, Hawaii, U.S.A., Dec. 9-13 (2010).

④ K. Yamanouchi, “Ultrafast Delocalization of Hydrogen Atoms in Hydrocarbon Molecules in Intense Laser Fields,” The 7th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (ICPEPA-7), Lundbeck Auditorium, Biocenter, Copenhagen, Denmark, Aug 17 (2010).

⑤ K. Yamanouchi, “Application of attosecond pulses and high-order harmonics to physics and chemistry” The 2nd International Conference on Ultra-Intense Laser Interaction Science, Laboratori Nazionall di Frascati, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Frascati, Italy, May 28 (2009)

⑥ K. Yamanouchi, “Ultrafast Hydrogen

Migration in Molecules in Intense Laser Fields: New Frontiers in Attosecond Chemistry” 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08), Trondheim, Norway, June 30-July 4 (2008).

⑦ K. Yamanouchi, “Ultrafast Hydrogen Migration in Hydrocarbon Molecules in Intense Laser Fields” The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2007), Seoul, Korea, Aug. 26-31 (2007).

⑧ K. Yamanouchi, “Ultrafast Hydrogen Migration in Hydrocarbon Molecules in Intense Laser Fields” International Conference on Photochemistry 2007, Cologne, Germany, July 29- Aug 3 (2007).

他 153 件

[図書] (計 9 件)

① 山内 薫、「強光子場科学の新展開」、『強光子場科学の最前線 2』(強光子場科学研究懇談会編)、第 1 章、pp. 1-10、強光子場科学研究懇談会 (2009).

他 8 件

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

報道関連情報

① 電子の散乱状況 フェムト秒の観測成功
—東大 連続写真撮影向け技術—
(日刊工業新聞 2010 年 9 月 17 日付 22 面)

ホームページ情報

<http://www.yamanouchi-lab.org/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山内 薫 (YAMANOUCHI KAORU)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：40182597

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

加藤 毅 (KATO TSUYOSHI)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：10321986

歸家 令果 (KANYA REIKA)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：10401168

沖野 友哉 (OKINO TOMOYA)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：40431895