

令和元年5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26247068

研究課題名(和文)アト秒量子波束ダイナミックスの研究

研究課題名(英文)Study on attosecond quantum wavepacket dynamics

研究代表者

鍋川 康夫 (Nabekawa, Yasuo)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・専任研究員

研究者番号：90344051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：アト秒パルス列を用いて、簡単な構造の分子の超高速ダイナミックスの観測と反応経路の制御に成功した。最初の実験ではH₂⁺分子の振動波束が生成される際に~1fs程度の準備時間が必要であることが明らかになった(Nat. Commun. 6:8197 (2015).)。次に、N₂をターゲットとした実験でアト秒電子波束生成が確認された(Sci. Adv. 1, e1500356 (2015))。H₂⁺分子については、振動波束の動きを利用することにより乖離経路を2p u状態から2p u状態へ、わずか8fsの遅延時間操作で切変えることに成功した(Nat. Commun. 7:12835(2016))。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者の知る限り、アト秒パルス誘起による量子波束制御の研究例はない。従って、アト秒パルスを超高速量子ダイナミックスを観測するためのプローブのみならず、励起や制御にも用いることができるということを実証した点で本研究の学術的な意義は大変大きい。これはアト秒パルスの高い光子エネルギーと広い周波数帯域という利点を複数の量子準位の励起に活かしたことによるものである。今後は、制御光とプローブ光を独立に制御することで、より複雑な量子波束制御への展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We could reveal ultrafast dynamics of simple molecules and succeed in controlling the reaction pathways using a pair of attosecond pulse train (APT). First, we discovered the ~1-fs settling time needed for creating a vibrational wavepacket in H₂⁺ molecule. Two-dimensional spectrogram, which was a record of the kinetic energy release (KER) of H⁺ fragment with scanning delay between two APTs, was analyzed by the frequency-resolved optical gating technique. We found the initial delays between the vibrational wavefunctions forming the wavepacket, which can be interpreted as the settling time (Nat. Commun. 6:8197 (2015).). Second, we found an attosecond electronic wavepacket generated in N₂ and N₂⁺ molecules (Sci. Adv. 1, e1500356 (2015).). Third, we controlled the dissociation pathways of H₂⁺ by utilizing the ultrafast vibrational motion. Only 8-fs delay difference of the control APT switched the dissociation pathway of 2p u state to that of 2p u state (Nat. Commun. 7:12835(2016)).

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：アト秒科学 高次高調波 非線形光学 量子制御 極端紫外 真空紫外 フェムト秒レーザー

1. 研究開始当初の背景

高強度のフェムト秒可視レーザー光を希ガスに集光する事によって発生する高次高調波は、光子エネルギー10eV程度から数100eVに渡る広い周波数帯域で位相同期している。このためこれを時間領域で観測すると1フェムト秒を切るパルス幅の光パルス、いわゆるアト秒パルスが形成されている。アト秒パルスの研究は21世紀の初頭から急速に進み、その発生技術の開発に加え、これを応用した分光研究を含めて「アト秒科学」と呼ばれる新たな分野となった (P. Corkum, et al., Nature Phys. **3**, 6 (2007))。特に、キャリア包絡線位相(CEP)を安定化した「数サイクルパルス」のチタンサファイアレーザーで発生する単一アト秒パルスをを用いた研究は、欧州に於いて盛んに研究が行われており、「アト秒科学」の守備範囲は電子の超高速過渡状態の研究へ広がってきている状況であった。

しかしながら、それまでの研究はいずれも「原子」と $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ を遥かに超える強度の「可視・近赤外基本波レーザー光」の高強度相互作用に基づく研究であり、(観測はアト秒パルスで行うもの)制御の時間分解能は基本波レーザー光のパルス幅(5フェムト秒程度)、またはその半サイクル周期(約1.3フェムト秒)で制限されていた。また、高強度光電場は非共鳴なコヒーレント励起に用いることが実証されていた(H. Goto, et al., Nature Phys. **7** 282 (2011)) が、光電場のパラメーターと励起状態の波束の関係は明らかではなく、電子や核波束の制御を明瞭な形で行うには不向きであると考えられた。よって、これらの問題を克服し、アト秒時間スケールでの電子・核波束状態の制御を行うためには、「アト秒パルス励起-アト秒パルス制御」の研究が不可欠であるとの認識が研究開始当初の背景にあった。

2. 研究の目的

本研究代表者のグループでは、高次高調波発生用のレーザー光を長焦点で集光する独自の手法により、高強度の高次高調波発生を行い、「アト秒パルス励起-アト秒パルス測定」の雛形である自己相関測定の研究を数年に渡って行ってきた。これにより、基本的な非線形相互作用である2光子過程(2光子2電子イオン化、2光子超閾イオン化、2光子解離・クーロン爆発)に成功し(Y. Nabekawa et. al., Phys. Rev. Lett. **96**, 083901(2006); Y. Nabekawa et. al., Phys. Rev. Lett. **97**, 153904 (2006))、サブ500アト秒の単一アト秒パルスの自己相関測定も行うこともできた(E. J. Takahashi et al., Nat. Commun. **4**: 2691(2013))。

そこで、本研究ではこの自己相関の手法をさらに発展させ、アト秒パルスを本格的に「制御」として用いることにより、励起原子・分子の超高速量子波束ダイナミックスの制御に用いる事を目指した。

3. 研究の方法

本研究代表者のグループでは速度マップ画像(VMI)取得型のイオン分光器を用いて、周期22フェムト秒の D_2^+ 分子の振動波束の実時間測定に成功していた(Y. Furukawa, et al., Opt. Lett. **37**, 2922 (2012))。プローブ光は基本波、及び高次高調波と同時に発生している、3倍波、5倍波(多色パルス)である。本研究では、この手法に改良を加えることで超高速量子波束ダイナミックスの制御を行った。光源は本研究採択者が開発したサブ15fsマルチTWチタンサファイアレーザーシステムからの出力光をXeガスセルに集光して得た高次高調波(アト秒パルス列、APT)である。緩集光の手法によりAPTのパルスエネルギーは高められており、発生点で μJ を超えていると見積られる。発生したAPTはシリコンミラー(SiBS)により反射され、基本波の大部分はここで吸収される。SiBSは上下2つのミラーに分かれており、この境界付近に入射したAPTは空間的に2つのビームに分けられる。下のSiBSはピエゾステージに乗っており、これを前後させることで2つのAPTの遅延時間が制御できる仕組みである。

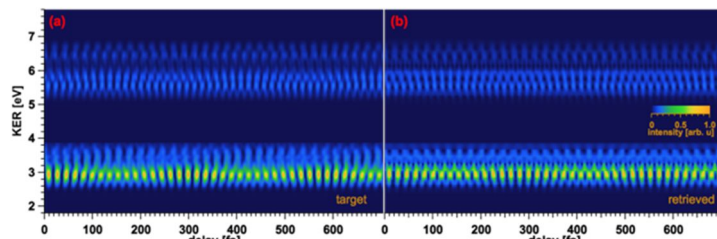


図1: (a)実験で得られた遅延-KER スペクトログラムにフーリエ変換を施し、振動準位の差周波のピークにバンドパスフィルターをかけて得られたデータ。これをMW-FROGの再構築アルゴリズムの入力とした。なお、KERが3eV付近の信号は3倍波励起、6eV付近の信号は5倍波励起による乖離によるものである。(b)再構築された遅延-KER スペクトログラム。

SiBSで反射されたAPT対はVMI型イオン分光器のチャンバーに入り、SiC製の凹面鏡によってダークゲットとなる分子ビーム中に集光される。VMI型イオン分光器では、発生したイオンを電極で加速し蛍光面付きのマイクロチャンネルプレート(MCP)に衝突させる。イオンの衝突した場所が蛍光するのでこれをカメラで記録して、イオンの角度分布を得

る。加速電極の電圧調整により、イオンの速度分布をMCP上の空間分布に転写するのでVMIと呼ばれる。実験では、2つのAPTの遅延を掃引しながらVMIを記録する。

4. 研究成果

D_2^+ 分子の振動波束の実時間測定結果は遅延時間と開放運動エネルギー(KER)の2軸を持つ2次元のスペクトログラムであった。乖離過程は振動波束の生じている基底状態($1s_g$)から最初の励起状態($2p_u$)への1光子遷移であることが分かったので、摂動計算によりスペクトログラムを解析式で表現することができた。この結果、遅延-KER スペクトログラムは周波数分解光学ゲート法(Frequency-resolved Optical Gating, FROG)に於ける2次元スペクトログラムと同様な成り立ちを持つことが分かった。FROGは光パルスのパルス波形・位相を再構築する手法であるので、この再構築アルゴリズムを遅延-KER スペクトログラムに適用すれば振動波束(物質波束)の位相を再構築できることを着想し、物質波 FROG(MW-FROG)と名付けた(雑誌論文[5])。ただし、これを実現するためにはイオン検知のS/N比の向上が必須であり、また振動準位を分解するために遅延掃引範囲を拡張する必要があった。また D_2^+ 分子よりも振動周期の短い H_2^+ 分子の実験も行える様に、真空排気系の強化も必要であった。これらの改良を行った後、 H_2^+ 分子および D_2^+ 分子について遅延-KER スペクトログラムの取得に成功した。またこれらに対して FROG アルゴリズムによる初期振動波束の再構築に成功した。図 1(a)に実験で得られた遅延-KER スペクトログラムにバンドパスフィルターをかけた MW-FROG のターゲットイメージ、図 1(b)にターゲットイメージから再構築された遅延-KER スペクトログラムを示す。MW-FROGにより、ターゲットスペクトログラムがよく再構築されている。このとき得られた H_2^+ の各振動準位の波動関数の振幅、位相から各振動波動関数の位相が一定ではなく、変調を受けていることがわかった。また理論計算を行うと、この結果とほぼ一致する位相変調が得られた。得られた位相を群遅延時間に換算すると、振動準位 3-4 付近とその他では 1-2fs 程度の群遅延時間差があり、イオン化に際して振動波束が「瞬時にできる」のではなく各準位が揃うまで 1-2fs 程度の「準備時間」を要していることがわかった。振動波束生成にどのくらい時間がかかるかという問題は、超高速光科学分野で全く顧みられてこなかったテーマであり、これに 1-2fs という「長い時間」が必要であると結論付けた本研究成果は非常に重要である。なお本研究成果は雑誌論文[4]に発表され研究代表者の所属する機関においてプレス発表された(http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150901_4/)。

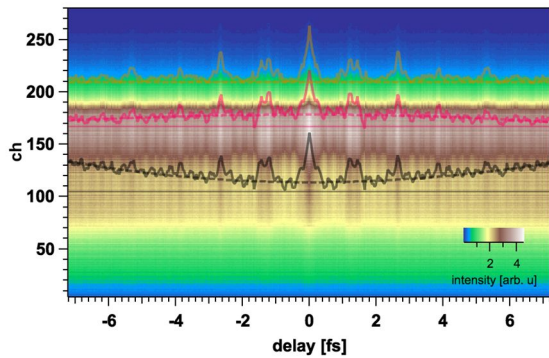


図 2: 乖離イオン N^+ のスペクトログラム。縦軸は中心からの距離。黒線は ch110 付近、赤線は ch170 付近、黄色線は ch220 付近のラインプロファイルをそれぞれ示している。

調を受けていることがわかった。また理論計算を行うと、この結果とほぼ一致する位相変調が得られた。得られた位相を群遅延時間に換算すると、振動準位 3-4 付近とその他では 1-2fs 程度の群遅延時間差があり、イオン化に際して振動波束が「瞬時にできる」のではなく各準位が揃うまで 1-2fs 程度の「準備時間」を要していることがわかった。振動波束生成にどのくらい時間がかかるかという問題は、超高速光科学分野で全く顧みられてこなかったテーマであり、これに 1-2fs という「長い時間」が必要であると結論付けた本研究成果は非常に重要である。なお本研究成果は雑誌論文[4]に発表され研究代表者の所属する機関においてプレス発表された(http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150901_4/)。

ターゲットを窒素分子として、アト秒時間スケールの量子波束の探索も行った。実験ではまず

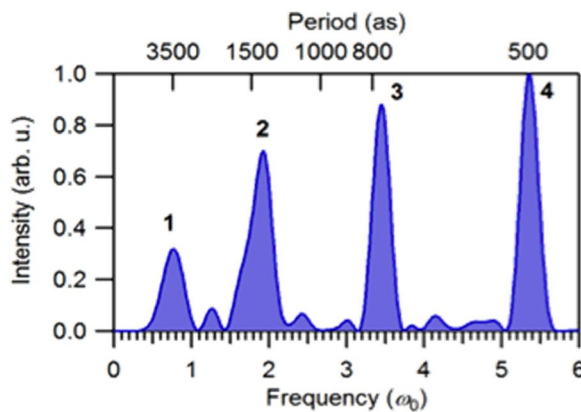


図 3: APT 自己相関のフーリエ変換強度。 N^+ イオンの遅延-KER スペクトログラムの中で KER0 が 0.4eV 付近のものだけライン

ターゲットを窒素分子として、アト秒時間スケールの量子波束の探索も行った。実験ではまず SiBS による APT の遅延時間掃引のステップ幅 36as とし、約 ± 7 fs の範囲で掃引した。イオン化・乖離過程で発生した N^+ 角度分布を VMI で測定して角度積分し、遅延時間順に並べた 2 次元図を図 2 に示す。なお、S/N 向上の為に遅延時間 0 に対して対称化してある。遅延時間 0 のピークから、約 1.3fs 毎にピークが現れ、電場干渉による細かい変調も見られる。これは N^+ スペクトログラムによる APT の干渉自己相関測定となっており、速度または KER によって相関波形は異なる特徴を示す。図 2 では相関波形のベースライン(点線)が縦軸(速度に比例)によって下に凸(ch130 付近)、上に凸(ch170)付近、直線(ch220 付近)と変化する様子が見られる。遅延時間掃引範囲を広くして遅延-KER スペクトログラムを測定することで、これらは核の振動波束の運動を反映していることがわかり、どの電子状態に於ける振動波束であるかも判明した。複数の電子状態がコヒーレントに励起されており、電子波束が形成されていることがこの結果から予想される。そこで APT の強度を下げて再び干渉自己相関測定を行ったところ KER の低い部分(-0.4eV)でアト秒時間スケールでの信号変調を見出すことができた。図 3 に干渉自己相関信号のフーリエ変換強度を示す。周期 500as のピークの外、3 つピークが明確に見えている。500as に対応するエネルギー差(約 8.3eV)から N_2^+ の $A^2 \Sigma_g^+$ と $C^2 \Sigma_u^+$ 、2 つの電子状態の重ね合わせによる電子波束が生成されていることが明らかになった。初めてのアト秒電子波束の直接測定である。本研究成果は雑誌論文[3]に発表され研究代表者の所属する機関においてプレス発表された(http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150926_1/)。

これらの成果を得た後、APT のビームラインの劣化部品の交換を行い、APT の強度の改善を行っ

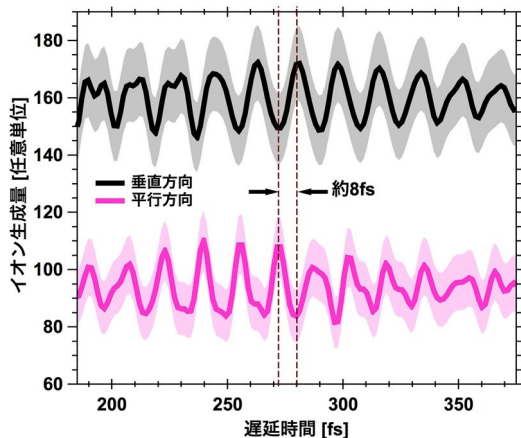


図 4: 2つのAPT間の遅延に対するH⁺イオンの生成量変化。黒線はAPTの偏光に垂直な成分、マゼンダ色線は平行な成分。平行成分は約272fsの遅延時刻で極大値、垂直成分は極小値をとるが、約8fs後に極大極小が入れ替わっている。これは乖離経路が8fsで入れ替わった様子を示している。

状態への励起が起こりやすく、外側の転回点にあるとき(H₂⁺の核間距離が最も広がったとき)2p_u状態への励起が起こりやすい。従って振動波束がこれらの転回点を移動するわずか8fsの間に、2p_u状態(偏光平行成分)から2p_g状態(偏光垂直成分)への乖離経路の切り替えがなされる。(図4)。これによって振動波束を用いた最も高速な反応制御が実現された。本研究成果は雑誌論文[1]に発表され研究代表者の所属する機関においてプレス発表された(http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160920_4/)。

以上の成果は、シリコンミラー(SiBS)2枚によるアト秒パルス列(APT)の「ポンプ・プローブ」実験によって得られたものである。アト秒パルスによる「制御」を本格的に行うために、マツハツェンダー型干渉計(MZI)配置によるコントロールビーム系を新たに追加し、3ビームによる実験系を開発した。これは高次高調波と共に発生している3倍波をダイクロイックミラーで空間的に分けて遅延制御をした後、合波するものである。MZIからのビームとSiBSからのビームの間の遅延ジッターは約82asであり、アト秒精度の実験が可能であることが分かった。またMZIビームラインを用いて18fs周期のH₂⁺分子振動波束の実時間観測にも成功した。さらにSiBSの遅延掃引により重水素からの乖離イオン信号に300アト秒周期の光学干渉成分があることも分かった。アト秒の干渉縞のビジビリティがまだ低いため装置改良が必要であるが、この結果によりアト秒コヒーレント制御の原理実証が可能になった。

以上の研究に加え、近年の研究動向が孤立アト秒パルスの応用に向かって来ている事を踏まえて、これまでのアト秒パルス列(APT)のビームラインの後継となる孤立アト秒パルス発生ビームラインを開発するための基礎研究を行った。孤立アト秒パルスは基本波のレーザー光の電場周期の中でターゲット分子が1度だけイオン化・再結合の過程を行なう際に発生される。従ってこのためには電場周期1サイクル(モノサイクル)程度のパルス幅を持つ高強度の超短パルスレーザーの開発が不可欠である。このときレーザー増幅装置に必要なスペクトル帯域は1オクターブを超える必要がある。通常のレーザー媒質でこのような特性をもつものはなく、光学パラメトリック増幅(OPA)が増幅手法として選ばれた。特に非線形結晶BBOはチタンサファイアレーザーの中心波長800nmではなく710nm近辺で励起するとtype Iの縮退位相整合条件に於いて1 μ mから2.2 μ mに及び優に1オクターブを超える利得が得られる事を申請者は独自に見出し、これをOPAレーザーシステムとして構築することとした。2段目のOPA出力光に分散補償光学系を適用した後、3段目のOPAを行う必要があるが、波長帯域が1オクターブを超えているため、通常の音響光学素子(AOPDF)1台では分散補償の帯域が不足する。そこで波長分割を行い短波長側・長波長側それぞれにAOPDFを適用した後、これらを波長合成する手法を開発した。合成された広帯域赤外光を増幅した後、励起光との和周波発生を行うことでパルス幅の測定を行った(周波数分解光学ゲート法、FROG)。分散補償を行わない場合は短波長側だけで2ps程度までパルス幅が伸びていることが確認された。分散補償を行い、計測の精度を上げるため2次元シアリング干渉法(2DSI)で群遅延測定を行った。その結果、フーリエ限界に近いパルス幅5.3fsが得られた。これは光電場キャリア周期の0.94倍に相当し、モノサイクルパルスとなっていることを意味する。単色フェムト秒パルス励起のOPAでモノサイクル光の増幅に成功したのは世界で初めてとなる成果である(学会発表[1,2])。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- [1] Yasuo Nabekawa, Yusuke Furukawa, A. Amani Eilanlou, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Sub-10-fs control of dissociation pathways in the hydrogen molecular ion with a few-pulse attosecond pulse train," *Nat. Commun.* **7**, 12835 (2016): DOI: 10.1038/ncomms12835 . (査読有り)
- [2] Yu-Chieh Lin, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Conical third-harmonic generation of optical vortex through ultrashort laser filamentation in air," *Opt. Express* **24**, 14857-14870 (2016): DOI:10.1364/OE.24.014857 . (査読有り)
- [3] T. Okino, Y. Furukawa, Y. Nabekawa, S. Miyabe, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Direct observation of an attosecond electron wave packet in a nitrogen molecule," *Sci. Advances* **1**, e1500356 (2015): DOI: 10.1126/sciadv.1500356 . (査読有り)
- [4] Y. Nabekawa, Y. Furukawa, T. Okino, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Settling time of a vibrational wavepacket in ionization," *Nat. Commun.* **6**, 8197 (2015): DOI: 10.1038/ncomms9197 . (査読有り)
- [5] Y. Nabekawa, Y. Furukawa, T. Okino, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Frequency-resolved optical gating technique for retrieving the amplitude of a vibrational wavepacket," *Sci. Rep.* **5**, 11366 (2015): DOI 10.1038/srep11366 . (査読有り)

[学会発表] (計 75 件)

- [1] Yu-Chieh Lin, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Dispersion control of an over-octave spanning shortwave infrared spectrum for the amplification of single-cycle pulses," 2019 Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2019), Munich, Germany.
- [2] Yu-Chieh Lin, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Optical parametric amplification of shortwave infrared monocycle pulses in BBO crystals pumped by red femtosecond pulses," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2019), San Jose, USA.
- [3] S. Fukahori, T. Matsubara, Y. Nabekawa, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Nonlinear Fourier transform spectroscopy of O₂ using intense XUV attosecond pulse trains," 3rd ETH Zurich-UTokyo Strategic Partnership Symposium (2109), Tokyo (invited).
- [4] Yu-Chieh Lin, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Optical parametric amplification of a more than one-octave bandwidth pulse in a BBO crystal pumped by a 712-nm tuned Ti:sapphire laser pulse," Nonlinear Optics 2017, Hawaii, USA.
- [5] Yasuo Nabekawa, Tomoya Okino, and Katsumi Midorikawa, "Observation and control of sub-10 fs dynamics in molecules using intense XUV attosecond pulse trains," 2nd International Symposium on Attosecond Science (2017), Saitama, Japan (invited).
- [6] Tomoya Okino, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Real-time Observation of Quantum Wavepackets of Molecules with a-Few-Pulse Attosecond Pulse Train," International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 15 (ISUILS 15) (2016), Cassis, France (invited).
- [7] Yasuo Nabekawa, Tomoya Okino, and Katsumi Midorikawa, "Probing attosecond dynamics of molecules by an intense a- few-pulse attosecond pulse train," The 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonics (2016), Osaka, Japan (invited).
- [8] T. Okino, Y. Furukawa, A. Amani Eilanlou, Y. Nabekawa, S. Miyabe, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Attosecond nonlinear Fourier transform spectroscopy of molecule with intense a-few-pulse attosecond pulse train: observation of vibrational and electron wavepackets," Attosecond Physics 2015, Quebec, Canada (invited).
- [9] Tomoya Okino, Yusuke Furukawa, A. Amani Eilanlou, Yasuo Nabekawa, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Observation of Vibrational and Electron Wavepackets in Nitrogen Molecule with Intense a-Few-Pulse Attosecond Pulse Train," The 8th Asian Symposium on Intense Laser Science (2014), Taipei, Taiwan (invited).
- [10] Yasuo Nabekawa, Yusuke Furukawa, Tomoya Okino, A. Amani Eilanlou, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Vibrational wavepacket reconstruction with frequency-resolved optical gating technique," JSAP-OSA Joint Symposia 2014, Hokkaido, Japan.
- [11] Tomoya Okino, Yusuke Furukawa, A. Amani Eilanlou, Yasuo Nabekawa, Eiji J. Takahashi,

Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Tracking Vibrational Wavepackets of Nitrogen Molecules by XUV-Pump XUV-Probe with Momentum Imaging," JSAP-OSA Joint Symposia 2014, Hokkaido, Japan.

- [12] Tomoya Okino, Yusuke Furukawa, A.Amani Eilanlou, Yasuo Nabekawa, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Observation of Attosecond Electron Wavepacket of Nitrogen Molecule by XUV Pump-probe with Nonlinear Fourier Transformation Spectroscopy," International Conference on Ultrafast Phenomena 2014, Okinawa, Japan.
- [13] Y. Nabekawa, Y. Furukawa, T. Okino, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Applications of intense sub-10-fs XUV harmonic fields to reveal ultrafast dynamics of simple molecules," Annual meeting / International symposium of Spectroscopical Society of Japan 2014, Saitama, Japan (invited).

〔図書〕(計1件)

[1] 古川裕介、鍋川康夫、緑川克美、CSJ Current Review 「強光子場の科学」, 第10章 (2015)、pp.91-97, 化学同人.

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

プレス発表

(1) 1,000兆分の1秒の時間遅延を観測

http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150901_4/

(2) アト秒領域の超高速分子内電子状態を直接観測

http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150926_1/

(3) 水素分子の解離過程を8フェムト秒で制御:-極端紫外アト秒パルス光によるコヒーレント制御の幕開け-

http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160920_4/

(2)は下記ダイジェスト版もあり

http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150926_1/digest/

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：高橋 栄治

ローマ字氏名：Eiji J. Takahashi (研究者番号：80360577)

研究協力者氏名：古川 裕介

ローマ字氏名：Yusuke Furukawa (研究者番号：20464232)

研究協力者氏名：沖野 友哉

ローマ字氏名：Tomoya Okino (研究者番号：40431895)

研究協力者氏名：神田 夏輝

ローマ字氏名：Natsuki Kanda (研究者番号：60631778)

研究協力者氏名：アマニ アブドルレザ

ローマ字氏名：Amani Abdolreza (研究者番号：80611491)

研究協力者氏名：リン ユーチー

ローマ字氏名：Yu-Chieh Lin (研究者番号：00752073)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。