

## 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：2009～2012

課題番号：21244066

研究課題名（和文） 周期可変アト秒パルス列による量子制御

研究課題名（英文） Quantum control by using an attosecond pulse train with a variable pulse period

## 研究代表者

鍋川 康夫 (NABEKAWA YASUO)

独立行政法人理化学研究所・緑川レーザー物理工学研究室・専任研究員

研究者番号：90344051

## 研究成果の概要（和文）：

我々は本研究に於いて、波長  $1.2\mu\text{m}$  から  $2.1\mu\text{m}$  に及ぶ広帯域赤外レーザーパルス光源を開発した。今後の改良により、高次高調波発生による原子・分子研究用の単一アト秒光源に発展可能である。既存のチタンサファイアレーザー高次高調波ビームラインを用いた実験において、サブ 20fs で高速運動する  $\text{D}_2^+/\text{H}_2^+$  の振動波束の様子を捉えた。これはサブ 10fs の極端紫外光で生成し、真空紫外光でプローブした量子波束の最初の観測事例である。

## 研究成果の概要（英文）：

We have developed a novel broadband infrared laser pulse source, the wavelength of which spans from  $1.2\mu\text{m}$  to  $2.1\mu\text{m}$ . This laser source can potentially generate an isolated attosecond pulse with the high-order harmonic generation to observe and control quantum states in atoms and molecules, even though the laser system should be improved. The preliminary study by using an existing harmonic beam line with a 12-fs Ti:sapphire laser revealed the sub-20 fs dynamics of the nuclear wave-packet (WP) generated on the adiabatic potential of  $\text{D}_2^+/\text{H}_2^+$  molecule. This was the first observation the WP pumped with a sub-10 fs extreme ultraviolet pulse and probed with a vacuum ultraviolet pulse.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2011年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2012年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	30,000,000	9,000,000	39,000,000

研究分野：数物系科学及び応用物理・工学基礎

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：アト秒パルス列、高次高調波、軟 X 線、非線形光学、量子波束

## 1. 研究開始当初の背景

アト秒パルス列は高強度のフェムト秒レーザーを希ガスに集光する事によって発生する奇数次の高次高調波によって合成される

光電場である。通常の可視光のレーザー光ではその光学周期以下である 1 フェムト秒以下のパルス幅を実現する事は難しいが、高次高調波では真空紫外～軟 X 線の高キャリア周波数の光が超広帯域に渡ってほぼ同じ強度で

発生しているため、合成電場の包絡線幅は優に1フェムト秒を切ることができる。この超短パルス性を利用した研究はヨーロッパを中心に行われてきており、光電場のベクトルポテンシャルの直接観測や、高強度電場によるイオン化過程の観測など超高速光科学の分野で刺激的な成果を残してきている。しかしながら、これらの例では用いるアト秒パルス光の強度が弱いので、高強度の可視レーザー光との併用で初めて観測できる対象に研究が限られており、またアト秒パルスそのものの制御で、物質の量子状態の制御を行ったものでもない。可視光のフェムト秒レーザー光を用いた研究成果の多くが物質との非線形相互作用を利用しており、これと光電場の制御を組み合わせる事によって、物質の量子状態の持つ位相を利用した反応制御が可能になった事は周知の通りである。アト秒パルスの応用研究に於いても、非線形相互作用を用いて初めて本当の意味でのアト秒時間スケールの物質変化の観測・制御が行えると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究申請者等は上記研究背景を踏まえて、非線形相互作用を起こすことのできる高強度の真空紫外～軟 X 線アト秒パルス列の発生・応用の研究を、これまで行ってきた。アト秒パルス列の発生は複数次数の高調波がフーリエ合成されている事に起因するが、フーリエ合成による光電場の生成は高次高調波特有のものではない。一般に位相同期したパルス列は周波数オフセット(FO)の安定した「櫛」上のスペクトル成分、いわゆる周波数コム of フーリエ合成によって得られる。この様な光パルス列の最も有用な例は、FO安定化モード同期レーザーであり、周波数のモード間隔(=パルス列間隔の逆数)がRFの領域にあることから、光周波数をRF以下の周波数精度で比較・決定するための道具として精密分光の分野で広く用いられている。一方時間領域でこのパルス列を見ると、列内のパルス同士が常に一定の位相関係を保っている(異なるパルス同士が干渉する)。近年、この性質を利用して、原子の電子状態あるいは分子内の振動状態を制御する新しい試みが行われてきており、特に、コヒーレントなパルス列の間隔を調整して原子の電子状態の干渉を制御する実験は2光子遷移による精密分光として大きな成果を上げている。同様な考え方を応用すれば、アト秒パルス列内では隣り合うアト秒パルス同士の位相関係が固定され、さらにこれがパルス毎に $\pi$ だけ変化する事が予想される。本研究ではこの「位相同期したパルス列」という性質を量子状態制御に応用する事を目的とした。高次高調波の場合、周波数モード

間隔が光学周波数領域にあるという点で精密分光には適さないが、可視レーザーがアクセス出来ないアト秒の時間領域でコヒーレントな量子制御が行えるという点で画期的であると考えられる。

## 3. 研究の方法

当初の研究方法は以下の通り3段階に分けて計画した。

(1)波長可変赤外高強度フェムト秒光源開発  
これまでアト秒パルス(列)の研究で用いられている基本波レーザーはすべてチタンサファイアレーザーであり、その中心波長は約800nmである。アト秒パルス列のパルス間隔はこの波長によって固定されてしまうため、これを波長可変としなければならない。チタンサファイアレーザーは波長可変ではあるが、パルス幅を数10フェムト秒に保ったまま、中心波長を変化させるのは難しい。また、後に述べる通り、高調波周波数モードの間隔を狭くする事によって同時に励起出来る電子準位が増える。そこで、本研究ではチタンサファイアレーザーの2倍程度の赤外領域に於いて高強度フェムト秒光源を開発する。波長可変領域としては $1.4\mu\text{m}\sim 1.8\mu\text{m}$ でアト秒パルス列のパルス間隔をチタンサファイアレーザーの1.75~2.25倍まで調節出来る様にし、パルス幅・ピーク強度については標準的なチタンサファイアレーザー増幅システムと同様の40~60フェムト秒・1TWを目指す。

### (2)高次高調波の最適化

高次高調波の波長域で非線形相互作用を起こすには、少なくとも $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度のピーク強度が要求される。高調波の最高次数は基本波の波長が長くなるに従って上昇するが、発生効率は下がる事が予想されている。適切な位相整合条件を調べる事により12eV以下の光子エネルギーで1 $\mu\text{J}$ 以上、30~50eVの領域で100nJ以上のパルスエネルギーを得、非線形相互作用に十分な強度を確保する。

### (3)アト秒パルス列による量子制御

最もシンプルな希ガス原子であるHeの2光子励起を主なターゲットとする。赤外フェムト秒レーザーの波長を $1.563\mu\text{m}\sim 1.627\mu\text{m}$ のスペクトルを含む様に調整すると、基本波の光子エネルギー26個分が $1\text{S}\rightarrow 2^1\text{S}_0$ の遷移エネルギーに相当する。1光子遷移は禁制なので、9次~17次の高次高調波にて形成されるアト秒パルス列のパルス間隔制御でこれらの2光子遷移を制御し、アト秒時間スケールでの量子制御をめざす。さらに、このアト秒パルス列では9次~19次の成分で $3^1\text{S}_0$ 状態への2光子励起も可能であるので、これら複数の量子状態で形成される電子波束をコントロールする事を最初に目指す。

(1)の赤外フェムト秒光源を開発するにあた

り、高エネルギーのQ-スイッチ YAG レーザーの2倍波(グリーンレーザー、パルス幅 8ns)と CPA レーザーシステムで増幅されたチャープしたチタンサファイアレーザー(パルス幅 400ps)の差周波混合で、赤外(IR)光を発生させる実験を行い、高強度の IR が得られるか否かの原理実証実験を行った。この結果差周波発生効率の低く、これを改善するためにはグリーンレーザーの改造に膨大なコストが必要になると予想された。このため、IR 光パルス発生的手法をチタンサファイア励起の OPA に変更した。その後の研究の進展によりチタンサファイアによる励起波長を通常より短い 710nm 近辺にする事により 1 オクターブを超える広帯域赤外パルスの発生が可能になる事が分かり、光源開発に関してはこちらを目標とするものに切り替えた。広帯域のスペクトルを同時発生することで、当初予定していた波長チューニングが不要になる利点がある。

(1)の研究手法変更に伴い、(2)の高次高調波最適化、及び(3)の応用実験の遅れが予想されたため、チタンサファイアレーザー(主に、パルス幅 12 フェムト秒、パルスエネルギー 40mJ、繰返し 100Hz、のレーザーシステム。必要に応じて他のレーザーも使用)による高次高調波ビームラインを構築・最適化を行い、原子・分子と高次高調波の相互作用による超高速量子ダイナミックスの研究の予備実験を開始した。

#### 4. 研究成果

赤外光源開発についての研究成果は以下の通りである。

赤外 OPA を励起するための短波長(710nm)のチタンサファイアレーザーシステムを開発した。基本設計は次の通りである。既存のチタンサファイアレーザーの短波長成分をオフナー型のパルス伸延器(回折格子溝密度 2000g/mm、オフナー光学系は曲率半径 600mm の凹面鏡と -300mm の凸面鏡で構成)を用いて切り出しと伸延(パルス幅 400ps 程度)を行い、再生増幅器で 100 $\mu$ J 程度のパルスエネルギーまで増幅する。その後、3~5 パス程度のマルチパス増幅器で 2mJ 程度のエネルギーを得る。これを回折格子によるパルス圧縮器に通して、パルスエネルギー 1mJ 程度、パルス幅 100fs 程度のレーザー光を得る。波長のチューニングについては、チタンサファイアの利得スペクトルをもとに注意深く設計した部分透過フィルターを最適化設計・開発し、これを再生増幅器及びマルチパス増幅器に挿入する事により実現する設計である。実験では、再生増幅器からの出力光で 200 $\mu$ J、その後の 4 パス増幅器の出力光で 4mJ のパルスエネルギーを得ることができた。中心波長は 714nm、繰返しは 200Hz である。開発した

部分透過フィルターの性能のおかげで、当初計画よりも短いパルス幅である 50fs、2.5mJ のパルスを圧縮後に得る事ができた。

このレーザーの出力光を励起光源として、赤外 OPA の予備実験を行った。種光となる自己位相変調白色光には高強度の基本波スペクトル成分が含まれるため、これを除去するための誘電体多層膜フィルターを新たに開発し、種光はこれに通された後、BBO 結晶に入射させる。励起光はこれと僅かに角度をつけて BBO 結晶に入射し、増幅された赤外のシグナル光と相ドラー光のパルスエネルギーとスペクトルを測定した。シグナル光、アイドラー光とも 1.2 $\mu$ m から 2.1 $\mu$ m の波長域のスペクトル成分を持ち、パルスエネルギーはそれぞれ 9 $\mu$ J (シグナル) 6 $\mu$ J (アイドラー)であった。スペクトルの測定範囲は使用した赤外分光器で制限されており、実際には 1 オクターブ以上のスペクトル増幅が行えている可能性が高い。

高次高調波ビームラインでは下記の研究成果が得られた。

本研究の最終目標であるアト秒領域に於けるポンプ-プローブ型の実験を行う為には、時間遅延の精度が波長よりも十分良くなければならない。そこで、我々の開発した干渉計測装置の時間遅延精度をテストした所、波長 30nm の軟 X 線領域においても干渉測定が出来るだけの十分な精度を備えている事が分かった。また、これとは異なるタイプの干渉計での実験ではチタンサファイアレーザーにその 2 倍高調波を重ねる事で、高次高調波の周波数がシフトする現象を世界で初めて発見した。これと同時にサブ 15fs のチタンサファイアレーザーの開発も進め、パルス幅 12fs、ピークパワー 3TW、繰返し 100Hz のシステムを完成させた。

このレーザーシステムを用いた高次高調波ビームラインを構築し、高次高調波発生最適化を行った後、高次高調波による原子・分子の超高速ダイナミックスを測定するための実験システムの開発を開始した。これまで得られていた飛行時間測定によるイオンの解離エネルギー測定に加え、イオン生成時の角度分布を測定出来る様に、「速度マップ画像計測装置(Velocity Map Imaging, VMI)」を新たに立ち上げ、重水素イオン、窒素イオンの VMI 計測に成功した。これらは高次高調波による非線形相互作用で生じた分子イオンの最初の VMI 計測である。

VMI 装置と干渉計測装置を組み合わせる事によって、重水素(D<sub>2</sub>)のポンプ-プローブ計測を行った。これまで得られていたプローブ波長(265nm の深紫外光と 160nm の真空紫外光)の干渉縞の他に約 22fs の周期で振動する成分が取得した信号から得られた。電子状態の

2 準位モデルによる解析から、この振動は  $D_2^+$  イオンの電子基底状態に於ける核振動波束を反映したものである事が明らかになった。これは高次高調波(11 次光)励起(イオン化)-真空(深)紫外プローブによる  $D_2^+$ 核振動波束に初めての観測例である。

同様の実験を水素( $H_2$ )でも行える様に、真空排気系の改善を行った。さらに遅延時間の拡張を行える様に干渉計を改造した。その結果、約 16fs 周期の  $H_2^+$ 核振動波束及びその再帰周期 290fs の観測にも成功した。これらの結果は量子波束を実験データから再構築するための新たな手法に繋がると考えられ、現在そのための解析作業を進めている最中である。窒素( $N_2$ )をターゲットとした実験では、窒素の時間変化を直接的に示す信号は得られていないが、使用した高次高調波の時間波形、及びそれに対する窒素分子の応答に関して新たな知見が得られている。窒素の 1 価イオン( $N^+$ )の生成量を 2 つの高次高調波の遅延掃引を行いながら記録すると、高次高調波の自己相関波形が得られる。この記録から高次高調波は僅か数個のアト秒パルスが 1.33fs に生じている 'a-few-pulse' アト秒パルス列である事が証明された。パルス列の包絡線の時間幅は  $5\sim 6$ fs 程度と推定され、前記重水素・水素に於けるポンプ-プローブ実験に十分な時間分解能を有している事が分かった。さらに、角度分解された運動量スペクトル成分についての相関波形を解析した所、高次高調波の波長、及びその差周波に対応した波長に依存して、相関波形や位相が各々異なっている事を見いだした。この結果から 'a-few-pulse' アト秒パルス列に対する窒素分子のイオン化と解離過程の詳細な情報を引き出せると考えられるので、現在その解析作業をさらに進めている状況である。これらイオンの角度分解分光に加え、VMI 装置の改良による He の電子スペクトルの角度分解分光実験についても準備を行っている。以上の成果をまとめると、新たな赤外パルス光源については高次高調波発生にはまだ至っていないが、パルスエネルギーの増加及び分散補償装置の導入を行えば単一アト秒パルス発生の行える光源に至るという段階まで開発を進める事ができた。また高次高調波を用いた量子制御については、分子の振動波束のサブ 20fs 時間分解分光に成功し、高次高調波による超高速原子・分子ダイナミックスの制御に向けた第 1 1 歩を記すことができた。

#### 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) 全て査読有

1. Y. Nabekawa, T. Shimizu, Y. Furukawa, E. J. Takahashi, and K. Midorikawa, "Interferometry of an attosecond pulse train generated from Xe gas target," *Chem. Phys.*, **414** (2013) 20-25.
2. A. Amani Eilanlou, K. L. Ishikawa, Y. Nabekawa, H. Takahashi, and K. Midorikawa, "Simulation of Intense Isolated Attosecond Pulse Generation with a Two-color Laser Field," *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, **132** (2012) 1265-1271.
3. Y. Furukawa, Y. Nabekawa, T. Okino, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, P. Lan, K. L. Ishikawa, T. Sato, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Resolving vibrational wave-packet dynamics of  $D_2^+$  using multicolor probe pulses," *Opt. Lett.* **37** (2012) 2922-2924.
4. 鍋川康夫、緑川克美、「アト秒パルス列の自己相関計測」、*レーザー研究*, **39** (2011) 916-922.
5. 金井恒人、高橋栄治、鍋川康夫、緑川克美 「混合ガス中の高次高調波発生とそのアト秒物理学への応用」、*光学*, **40** (2011) 136-141.
6. E. J. Takahashi, P. F. Lan, O. D. Mucke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Infrared Two-Color Multicycle Laser Field Synthesis for Generating an Intense Attosecond Pulse," *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010) 233901 1-4
7. Y. Furukawa, Y. Nabekawa, T. Okino, S. Saugout, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Nonlinear Fourier-transform spectroscopy of  $D_2$  using high-order harmonic radiation," *Phys. Rev. A*, **82** (2010) 013421 1-5.
8. A. Amani Eilanlou, Y. Nabekawa, K. L. Ishikawa, H. Takahashi, E. J. Takahashi, and K. Midorikawa, "Frequency modulation of high-order harmonic fields with synthesis of two-color laser fields," *Opt. Express*, **18** (2010) 24619-31.
9. Y. Nabekawa, A. Amani Eilanlou, Y. Furukawa, K. L. Ishikawa, H. Takahashi, and K. Midorikawa, "Multi-terawatt laser system generating 12-fs pulses at 100 Hz repetition rate." *Appl. Phys. B*, **101** (2010) 523-534.
10. Y. Nabekawa, T. Shimizu, Y. Furukawa, E. J. Takahashi, and K. Midorikawa, "

Interferometry of Attosecond Pulse Trains in the Extreme Ultraviolet Wavelength Region,” Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 213904 1-4

11. 鍋川康夫、緑川克美、「高強度アト秒パルス列」化学と工業、**62** (2009) 800-803

[学会発表] (計 53 件)

うち招待講演 計(8)件

1. Y. Nabekawa, “Nonlinear Fourier-transform spectroscopy of  $D_2$  using laser high-order harmonics,” XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Lanzhou, China, 24-30 July 2013: invited.
2. Y. Furukawa, T. Okino, Y. Nabekawa, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Vibrational Wave-Packet Evolution of Hydrogen Molecular Ions Studied by the Pump-Probe Spectroscopy Using Harmonic Pulses,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Kyoto, 30 June- 4 July 2013.
3. T. Okino, Y. Furukawa, A. Amani Eilanlou, Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Dissociative Ionization Dynamics of Nitrogen Molecule with Interferometric Autocorrelation of a-few-pulse Attosecond Pulse Train,” 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA. 9-14 June 2013.
4. Y. Furukawa, T. Okino, Y. Nabekawa, A. Amani Eilanlou, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Time-resolved Measurement of Vibrational Wave-Packet Dynamics of  $H_2^+$  Using Multicolor Probe Pulses,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC 2013), 12-16 May 2013, Munich, Germany.
5. T. Okino, Y. Furukawa, A. Amani Eilanlou, Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Interferometric autocorrelation measurement of a-few-pulse attosecond pulse train utilizing the anisotropy of fragment ions,” Ultrafast Optics IX, 2-8 March, 2013, Davos Congress Centre, Switzerland.
6. E. J. Takahashi, P. Lan, O. D. Muecke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, “Energy scaling of isolated attosecond pulses,” The 7th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS7), 8-9 Nov. 2012, Tokyo: invited.
7. E. J. Takahashi, P. Lan, O. D. Muecke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, “Gigawatt-scale isolate attosecond pulses by high-order harmonic,” The 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP10), Taipei, Taiwan, Republic of China, 23-30 October, 2012: invited.
8. 鍋川康夫、緑川克美。「オクターブ赤外パルス光発生用励起レーザーシステムの開発 2」第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日~9 月 14 日、愛媛大学・松山大学。
9. Y. Nabekawa, “Time-and Energy-Resolved Spectroscopy Using Intense XUV Harmonic Pulses,” The joint workshop of the 5th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray Radiation (5th AWCXR) and the ISSP International Workshop on Coherent Soft X-ray Sciences, 27 June 2012, Kashiwa: invited.
10. Y. Furukawa, Y. Nabekawa, P. Lan, E. J. Takahashi, T. Okino, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Resolving ultrafast wave-packet dynamics of  $D_2^+$  using multiple harmonic pulses of Ti:Sapphire laser,” 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA. 6-11 May 2012.
11. 古川裕介、鍋川康夫、イランル・アマニ、ペンフェイ・ラン、高橋栄治、沖野友哉、山内薫、緑川克美、「サブ 15-fs レーザーの高調波を用いた  $D_2^+$  の核振動波束ダイナミクスの実時間観測」第 59 回応用物理学会関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日~3 月 18 日、早稲田大学：招待講演。
12. 古川裕介、鍋川康夫、沖野友哉、山内薫、緑川克美、「高次高調波パルス対を用いた重水素分子の解離性イオン化過程に関する研究」レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 2012 年 1 月 30 日~2 月 1 日、TKP 仙台カンファレンスセンター：招待講演
13. Y. Furukawa, Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, T. Okino, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Full-scanning nonlinear Fourier-transform spectroscopy of  $D_2$  using high-order harmonic radiation,” 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)

- Pacific Rim. Sydney, NSW, Australia. 28 Aug.-1 Sept. 2011.
14. Y. Nabekawa, Y. Furukawa, A. Amani Eilanlou, K. L. Ishikawa, E. J. Takahashi, and K. Midorikawa, "Development of an intense high-order harmonic beam line using a sub-15fs multi-terawatt laser system at 100-Hz repetition rate," 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim. Sydney, NSW, Australia. 28 Aug.-1 Sept. 2011.
  15. Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, Y. Furukawa, T. Okino, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "XUV interferometry of attosecond pulses," 3rd International Conference on Attosecond Physics (ATTO3), Sapporo, Hokkaido, 3-8 July 2011:invited.
  16. Y. Nabekawa, Y. Furukawa, A. Amani Eilanlou, K. L. Ishikawa, E. J. Takahashi, and K. Midorikawa, "Generation of sub-15fs pulses with multi-terawatt peak power at 100-Hz repetition rate," 2011 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & 12th European Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/EQEC. Munich, Germany. 22-26 May 2011.
  17. Y. Furukawa, Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, T. Okino, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "Full-scanning nonlinear Fourier-transform spectroscopy of D<sub>2</sub> using high-order harmonic radiation," 2011 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & 12th European Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/EQEC. Munich, Germany. 22-26 May 2011.
  18. 鍋川康夫、緑川克美、「オクターブ赤外パルス光発生用励起レーザーシステムの開発」第58回応用物理学関係連合講演会、2011年3月24日~3月27日、神奈川工科大学。
  19. E. J. Takahashi, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Generation of water-window X-ray and attosecond harmonics by IR parametric source," 2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PACIFIC RIM), Shanghai, China. 30 Aug.-3 Sept. 2009:invited.
  20. Y. Furukawa, T. Okino, K. Yamanouchi, S. Saugout, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Fourier spectroscopy of fragmentation of D<sub>2</sub><sup>+</sup> irradiated with

attosecond pulse trains," 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Baltimore, MD, USA. 2-4 June 2009.

[図書] (計3件)

1. Y. Nabekawa, E. J. Takahashi, Y. Furukawa, T. Okino, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, "XUV interferometry of attosecond pulses," *Multiphoton Processes and Attosecond Physics* edited by K. Yamanouchi and K. Midorikawa, pp. 127-135, 2012, Springer Proceedings in Physics 125, ISBN 978-3-642-2894-7.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鍋川 康夫 (NABEKAWA YASUO)  
独立行政法人理化学研究所・緑川レーザー物  
理工学研究室・専任研究員  
研究者番号：90344051

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

高橋 栄治 (TAKAHASHI EIJI)  
独立行政法人理化学研究所・緑川レーザー  
物理工学研究室・専任研究員  
研究者番号：80360577

古川 裕介 (FURUKAWA YUSUKE)  
独立行政法人理化学研究所・高強度軟X線  
アト秒パルス研究チーム・基幹研究所研究  
員  
研究者番号：20464232

金井 恒人 (KANAI TSUNETO)  
独立行政法人理化学研究所・東原子分子物  
理研究室・研究員  
研究者番号：00442947

### (4) 研究協力者

A. Amani Eilanlou  
独立行政法人理化学研究所・緑川レーザー  
物理工学研究室・特別研究員  
研究者番号：80611491

沖野友哉 (OKINO TOMOYA)  
独立行政法人理化学研究所・光量子工学研  
究領域・エクストリームフォトンクス研究  
グループ・アト秒科学研究チーム・研究員  
研究者番号：40431895