

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2年 6月 19日現在

機関番号：12601
研究種目：特別推進研究
研究期間：2015～2019
課題番号：15H05696
研究課題名（和文）サブフェムト秒分子イメージング
研究課題名（英文）Sub-femtosecond molecular imaging
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
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：399,600,000 円

研究成果の概要（和文）：

高輝度超短パルスレーザー光源を用いたポンプ・プローブイオン計測、レーザーアシステッド電子散乱計測などの手法を開発するとともに、発展型時間依存多配置ハートリーフォック法などの理論手法によって、強レーザー場の中で進行する原子および分子のサブフェムト秒超高速ダイナミクスを解明した。有機分子のイオン化に伴う分子内水素原子マイグレーション過程がサブフェムト秒領域の電子励起過程に影響を与えることなど、サブフェムト秒領域の分子ダイナミクスを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子が光励起されると分子内の電子が光電場に瞬時に応答し電子励起やイオン化が起こり、引き続き進行する分子内の核の運動が化学変化をもたらす。本研究では、これまで明らかにすることができなかったサブフェムト秒領域で起こる超高速過程を、メタノールや窒素分子などの分子を対象として、超短パルスレーザー技術に基づく計測手法を開発するとともに、光電場の中で互いに相関する分子内の電子および核のダイナミクスを記述する理論手法を開発することによって解明した。

研究成果の概要（英文）：

By developing experimental methods such as pump-probe ion measurements and laser-assisted electron scattering using intense ultrashort pulsed laser sources and by using theoretical methods represented by the extended multi-configuration time-dependent Hartree-Fock method, we have unveiled sub-femtosecond ultrafast dynamics of atoms and molecules in intense laser fields. We have clarified sub-femtosecond molecular dynamics such as intramolecular hydrogen-atom migration in organic molecules, affecting the electronic excitation processes in the sub-femtosecond time domain.

研究分野：

基礎化学、物理化学

キーワード：

超高速化学、反応動力学、強光子場科学、量子動力学

1. 研究開始当初の背景

近年の超短パルス光発生技術の進歩により、5 fs 程度の極超短レーザーパルスの発生が可能となり、10 fs 以内に動く分子内の水素原子移動など、分子内の特徴ある超高速過程が明らかにされてきた。しかし、光励起の時間内に起こる分子内の電荷移動過程や、その電荷移動に伴って誘起される水素原子の集団的分子内移動を実時間観測するためには、5 fs の時間分解能では不十分である。サブフェムト秒領域 (1 fs 以下) の時間領域で進行する化学過程を観測することは、当時、超高速化学分野における最大の課題となっていた。

2. 研究の目的

これまでの超高速分子過程の研究 (フェムト秒化学) では、光励起の後に電子励起状態や振動励起状態に励起された分子の幾何学的構造が、5 fs から 1 ps 程度の時間内 (フェムト秒領域の時間) に如何に変化するかを追跡することが主たるテーマであった。しかし、光励起にともなう分子系の運命を決定づけるのは、「光に応答した電子群の運動が後続する核の運動をどのように支配するのか」という点であり、それを理解するためには、電子とプロトンなどの軽い核の運動が互いに相関しあうサブフェムト秒(10-1000 as)領域のダイナミクスを理解しなければならない。本研究では、研究代表者らが独自に開発してきた実験手法 (CMI 法と LAED 法) と量子動力計算手法 (Ex-MCTDHF) を発展させることによって、このサブフェムト秒領域の分子応答を観測し、その機構を理解することを目指す。そして、電子-核分布の超高速スナップショット観察によって分子内の電子と核の動きを動画として初めて撮影し、分子系における電子運動、核運動、および、電子-核相関運動が如何にして化学反応を誘起するかを解明する。

3. 研究の方法

- (1) 既設の 5 kHz のレーザーシステム、および、新規に導入する 100 kHz の先端レーザーシステムと高次高調波発生装置を整備することによって、アト秒ビームラインを構築する。
- (2) フェムト秒およびサブフェムト秒レーザーパルスによって分子をイオン化し、光電子とイオンのコインシデンスイメージング計測を行う。
- (3) レーザーアシステッド電子散乱 (LAES) 過程を利用したレーザーアシステッド電子回折 (LAED) 法および LAED 時空間干渉法によって、構造変化している瞬間の分子の電子回折像をサブ 10 fs からサブフェムト秒の時間分解能で観測する。
- (4) Ex-MCTDHF 法の実時間計算コード、および、MCTDH 法に基づいた核波束動力計算コードを開発し、それらのコードを用いた計算を (2)、(3) の成果と比較することによって、サブフェムト秒領域で起こる電子と核の相関運動機構を明らかにする。

4. 研究成果

- (1) **新規 100 kHz 繰り返し先端レーザーシステムの導入と、新規、既存レーザーシステムのアト秒高次高調波ビームラインの整備**

(1-1) 新規 100 kHz 繰り返し先端レーザーシステムの導入: 新規に導入する高強度極短パルスレーザー光源装置(100 kHz)の仕様を定め、高繰り返し Yb レーザー装置の出力をもとにしたシード光を利用した OPCPA (チャープパルスパラメトリック増幅器) 方式の光源を導入した。最短パルス時間幅は 8 fs、搬送波包絡線位相(carrier-envelope phase: CEP)の安定性として 220 mrad を達成した。さらに、この波長 790 nm の出力を Xe ガスに集光することにより、波長 35-60 nm の領域のアト秒高次高調波パルス列を繰り返し 100 kHz で発生させた。

(1-2) アト秒高次高調波ビームラインの構築: 近赤外フェムト秒レーザーシステム(5 kHz)により発生させた数サイクルパルスを Xe および炭化水素ガスに集光し、連続スペクトルを持つ極端紫外領域の高次高調波を得た。この高次高調波と近赤外パルスを用いて時間分解光電子スペクトルを測定し、光電子エネルギーが近赤外光の電場変動に伴って変化することを観測した。

(1-3) 高次高調波の集光光学系

(1-3a) 高次高調波集光の集光光学系の開発: 近赤外フェムト秒レーザーシステム(1 kHz)を用いて、波長 9-17 nm の高次高調波を東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻三村研究室において作成した Ni 製回転楕円ミラーによって集光したところ、ナノメートル領域 (350×380 nm²) に集光できることが示された[10, 27]。

(1-3b) 高次高調波集光の結像光学系の開発: 回転楕円ミラーと同じ製法によって製作した Wolter ミラーを結像光学素子として用いた軟 X 線顕微装置を構築し、その評価を行った。高次高調波 (波長 28-42 nm および 10-20 nm) を試料表面に集光し、試料透過光を Wolter ミラーで CCD カメラ上に結像したところ、1 ショット照射で 200 nm 以下の結像分解能を得た[6]。

(1-3c) 高次高調波の微細集光による加工への応用:(1-3a)において開発した回転楕円ミラーを用いた集光光学系によって極端紫外域の高次高調波を回折限界にまで集光し、アクリル樹脂薄膜および金属ナノ粒子レジスト薄膜の微細加工をおこない、0.67 μm×0.44 μm (半値全幅) の微細穴加工に成功した。原子間力顕微鏡で観測した加工深さを照射強度の関数としてプロットし、高次高調波の照射強度がアブレーションを引き起こす程に高いこと明らかにした[3]。

(2) フェムト秒およびサブフェムト秒レーザーパルスを用いた分子のイオン・光電子の相関画像計測

(2-1) フェムト秒領域のパルスを用いたサブフェムト領域のダイナミクス

(2-1a) 光電子 CMI 計測による絶対 CEP の同定法の開発 円偏光数サイクルパルスを用いた分子のイオン・光電子の相関画像計測を行い、光電子分光装置内のイオン化点においてレーザーパルスの絶対 CEP が求められることを示した (図 1(a),(b)) [24]。さらに、数サイクルパルスの時間幅を見積もることができることを示した [15]。光電子分光装置内にイオン種検出のための CMI 計測器を導入し、メタノール分子の解離過程を時間幅 4 fs のレーザーパルスによって観測し、メタノールの一重イオン化および二重イオン化過程の絶対 CEP 依存性を調べたところ、二重イオン化過程に伴うフラグメント放出の空間異方性が最大となる絶対 CEP は、トンネルイオン化した光電子が再衝突するまでにかかる時間 (1~2 fs) を反映することが明らかとなった (図 1(c)) [2]。さらに水素マイグレーションを伴うメタノールイオンの励起状態の生成には、マイグレーションを伴わない励起状態の生成に比べて、280 as だけ余計に時間がかかることを示した。

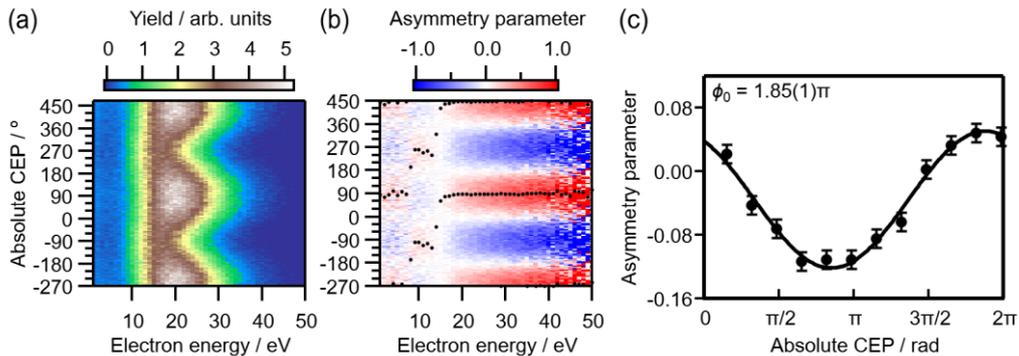


図 1: (a) 円偏光数サイクルパルスによる Ar 原子の光電子スペクトルの CEP 依存性[24]。 (b) (a)から計算された非対称性パラメータ[24]。 (c) メタノール分子の二重イオン化により放出した CH_3^+ イオンの非対称性パラメータ[2]。

(2-1b) 空气中フィラメントにおける窒素分子イオンの反転分布

近赤外域の sub-10 fs レーザーパルスを空气中に集光すると空気レーザーと呼ばれる指向性のある 391 nm の光が発生することを明らかにし、反転分布が極めて短い時間スケールで完了することを示した。そして、サブフェムト秒領域で N_2^+ イオンが瞬時に強光電場に晒される「瞬時電場印加モデル」とともに、「B-X-A 状態間のコヒーレント結合モデル」を提案し、B-X 状態間の反転分布状態の生成を数値計算によって再現した[29]。その後、 N_2^+ の擬定常フロケ法により瞬時電場印加モデルによって反転分布が生成することを理論的に実証した[12,20]。また、空気レーザー光の分子配向依存性を、B-X-A 状態間のコヒーレント結合モデルによって再現した[19]。一方、偏光方向変調レーザーパルスによって A-X 遷移を増強すると、391 nm の空気レーザー光の強度が 2 桁上昇することを示した[13]。そして、近赤外数サイクルパルスによるポンプ・プローブ計測 (図 2(a)) によって、空気レーザー光の強度が遅延時間に対して 2-3 fs の周期で振動することを示し、そのフーリエ変換スペクトル (図 2(b)) から、この振動が A-X 状態間の量子ビートに相当することから、B-X 状態間の反転分布生成に A-X 遷移が関与することを実証した[8]。さらに、偏光方向変調パルスのパラメータを変えながら、391 nm と 428 nm の B-X 遷移の空気レーザー強度を比較し、391 nm のレーザー光のみに A-X 遷移の影響が現れることを示した[7]。また、レーザー場強度を最適化すれば、回転励起準位のみが反転分布を持つこ

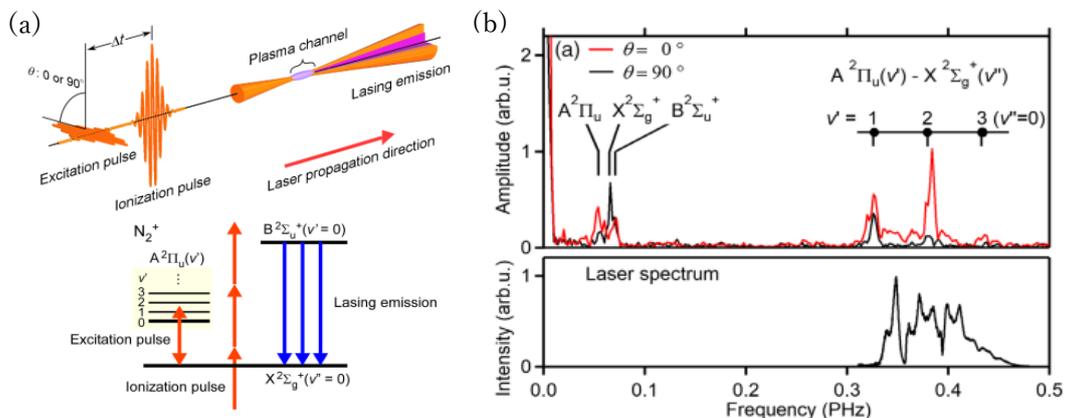


図 2: (a) 空气中の窒素イオンの B-X-A 状態結合によるレーザー発振機構の模式図。 (b) レーザー増幅光の高分解能フーリエ変換スペクトル (上)、およびレーザースペクトル[8]。

とを、回転の自由度を含めた理論計算によって明らかにした[4]。

(2-1c) フェムト秒パルス光によるイオン化における光電子と分子イオンのエンタングルメント パルス幅が0.4から5フェムト秒のXUVパルスを用いた水素分子のイオン化において、水素分子イオンの振動状態と光電子の間のエンタングルメントと水素分子イオンの振動状態間のコヒーレンスをモデル計算によって調べた。そして、パルスの時間幅の増加に伴いコヒーレンスは減少し、エンタングルメントが増加する一方、電場強度を増加に伴う振動状態間のラマン遷移のためにコヒーレンスが增加し、エンタングルメントが減少することを示した[9]。

(2-2) サブフェムト秒時間分解能の時間分解 CMI (相関運動量画像) 計測 近赤外フェムト秒レーザーシステム(5 kHz)より発生させた数サイクルパルスを用いて、メタノールとその部分重置換体や水分子とその重置換体などの分子について、サブフェムト秒の時間分解能で時間分解 CMI (相関運動量画像) 計測を行った。メタノールの場合、 CH_3OH の1価カチオンのCO伸縮振動の位相に同期して H_3^+ が放出することを見出した(図3)。水分子の3体クーロン爆発過程($\text{H}_2\text{O}^{3+} \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}^+ + \text{H}^+$)の計測結果から、解離の進行とともに結合角 $\angle\text{HOH}$ が時々刻々変化することを示した。また、部分重置換体のクーロン爆発過程($\text{HDO}^{2+} \rightarrow \text{H}^+ + \text{DO}^+$, $\text{HDO}^{2+} \rightarrow \text{D}^+ + \text{HO}^+$)の収量の周期的変動から一価イオンの対称伸縮モードと非対称伸縮モードの振動数を求め、周期変動の位相から振動運動が誘起される際の初期位相を高い時間精度(~ 0.5 fs)で決定した[11, 18]。一方、遅延時間を500 psまで延ばしてイオン収率を測定し、そのフーリエ変換から、 D_2^+ の電子基底状態の振動回転準位のエネルギーを 10^{-4} cm^{-1} の不確かさで決定した[16]。

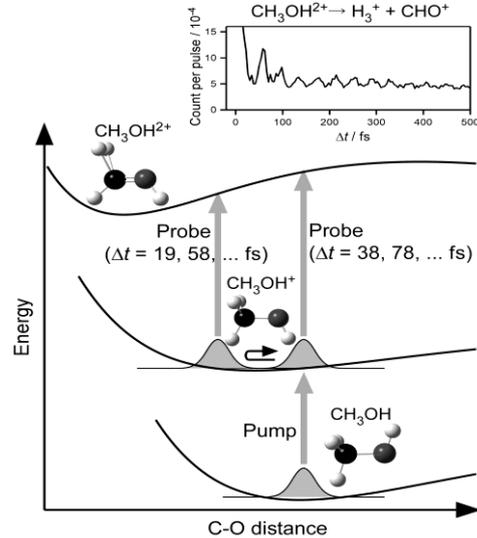


図3:メタノールのポテンシャルエネルギー曲線と H_3^+ 分子の収量の遅延時間依存性[18]。

(2-3) 高次高調波およびアト秒パルス列を用いた超高速ダイナミクス

(2-3a) アト秒パルス列高次高調波を用いた分子ダイナミクスの観測: 理化学研究所との共同研究として、投影型運動量画像計測装置を用いて、極端紫外域のアト秒パルス列による酸素分子のポンプ・プローブ計測を行った。 O^+ イオン収量の遅延時間依存性をフーリエ変換し、 O_2^+ の2つの電子状態 $\text{B } ^2\Sigma_g^-$ と $3 ^2\Pi_u$ が生成した結果、1 fsの周期で振動する電子・核波束が生成することを示した[1]。また、アセチレンから生成する C^+ イオンの計測からアト秒パルス列の自己相関幅を ~ 300 asと求め、 CH^+ イオンの計測から、アセチレンイオンの $\text{X } ^2\Pi_u$ 状態がポンプ光による光イオン化によって生成した後、プローブ光の中の7次高調波(11 eV)により $3 ^2\Pi_g$ 状態に励起され、C-C結合が解離することを示した。

(2-3b) 高次高調波を用いたサブフェムト秒分解能の分子イオンおよび電子の相関観測: 近赤外フェムト秒レーザーシステム(5 kHz)の数サイクルパルス出力を希ガス媒質に集光し、極端紫外域の高次高調波を発生させ、この極端紫外光と数サイクルパルスを用いたポンプ・プローブ実験によって、高電子励起状態に生成した N_2^+ の解離過程の実時間計測を行った。その結果、C状態に生成した N_2^+ が数十フェムト秒の間に解離する過程と、シェイクアップ過程により生じた N_2^+ が近赤外光照射により二重イオン化したのちクーロン爆発する過程を見出した[26]。

(3) レーザーアシステッド電子散乱(LAES)と電子回折(LAED)

(3-1) LAED法のためのLAES技術開発

(3-1a) 高感度LAES装置の開発: 角度分解飛行時間型LAED観測装置(図4(a))を完成させ、繰り返し周波数5 kHzの近赤外フェムト秒レーザーシステムを用いて、Xe原子によるレーザーアシステッド弾性電子散乱信号を取得し、検出効率が以前の装置[32]の約50倍であること

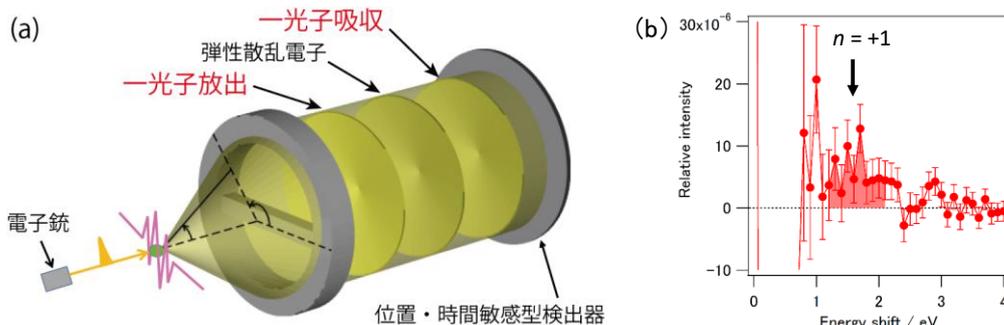


図4: (a) 製作した角度分解飛行時間型LAED観測装置図。(b) 数サイクルレーザーパルスによって誘起された $n = +1$ のLAES信号。

を示した。さらに、 $n = +1$ の LAES 信号に関して、レーザーの偏光方向に対する散乱強度の方位角依存性を観測し、LAES 信号強度の散乱角と方位角の二次元分布を求めた。

(3-1b) 数サイクルパルスによる LAES 計測：LAED 時空間干渉法の測定を実現するために、中空ファイバー圧縮法を用いた数サイクルレーザーパルス発生装置を構築した。発生したパルス幅 7.4 fs の広帯域超短レーザーパルスを用いて、 $n = +1$ の LAES 信号を測定した (図 4(b))。

(3-1c) 高次 LAES 測定によるアト秒精度の衝突時刻計測：超短パルスレーザーによる高次 LAES 信号を観測した。LAES 信号の実測データを用いて、LAES 過程を半古典論近似で取り扱うことによって、電子が標的原子・分子に衝突した時刻をアト秒精度で決定した[23]。

(3-1d) ストリーキング型 LAED 法の開発：THz 波によるストリーキング型レーザーアシステッド電子散乱過程による分子イメージング法[22]の実現のために、単一サイクル THz 波発生システムを構築し THz 波パルスを発生させ、(3-1a)の LAED 観測装置に導入した。

(3-2) レーザーアシステッド(e2e)計測による光ドレスト電子軌道測定

強レーザー場による原子・分子の瞬時的電子構造変化を測定するために角度分解飛行時間型(e,2e)観測装置(図 5)を製作した。近赤外レーザー光(100 kHz)を用いた散乱電子と放出電子のコインシデンス計測を行い、Ar 原子の $n = +1$ のレーザーアシステッド(e,2e)過程を観測した。数値計算から、 $n = +1$ の信号強度が光電場による Ar の 3p 軌道の歪みを反映することを示した。

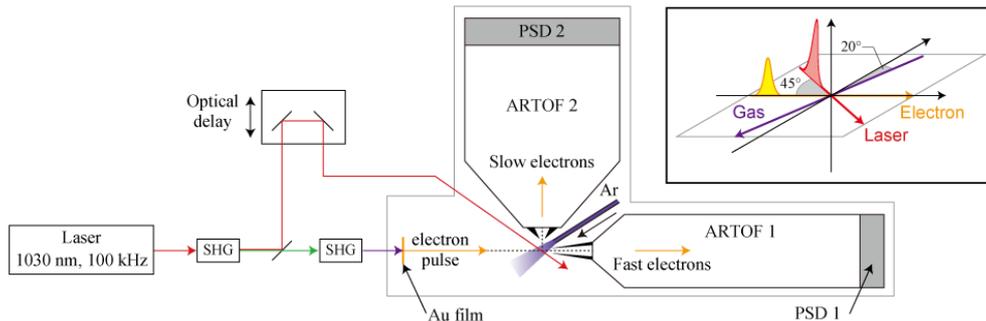


図 5: 製作した角度分解飛行時間型電子衝撃イオン化観測装置図。

(4) BO 近似を超えた量子動力学理論

(4-1) Ex-MCTDHF 法 および MCTDHF 法による強レーザー場分子ダイナミクス：強レーザー場における H_2^+ 分子の振動励起と解離過程の実時間発展を Ex-MCTDHF 法によって計算し、厳密解法との比較を行った。軌道関数を増加させることによって厳密解法に漸近することを示した(図 6) [14]。さらに、Ex-MCTDHF 法によって CH_3OH の電子プロトン波動関数の実時間計算を行うための計算コードを開発した。また、CI 係数分解近似を MCTDHF の枠組みで定式化し、1次元のモデル系による数値計算を行った[28]。さらに、MCTDHF で計算された電子励起状態の波動関数の数値検証を行った[5]。

(4-2) 時間依存断熱状態ポテンシャルの効率的構築：強レーザー場中にある分子振動を時間依存断熱ポテンシャルの上での運動として記述することを目指し、中性および一価イオンの分子振動を表現する 2 面 Hénon-Heiles ポテンシャルの効率的な構築を試みた。モデルに適用した。そして、電場振幅の 2 次までを取り込んだ外部電場との相互作用を仮定した場合、2 つの Hénon-Heiles ポテンシャル面が分子振動経路に沿って効率的に求められることを確認した。

(4-3) 弱く結合した He... H_2^+ の強光子場における動力学計算：弱く結合した He... H_2^+ の強光子場における動力学計算を、2次元 3電子状態モデルを用いて解析し、He 原子の存在により H_2^+ の解離反応が抑制されるばかりではなく、電子励起に伴って化学結合の組み換え反応が起こり

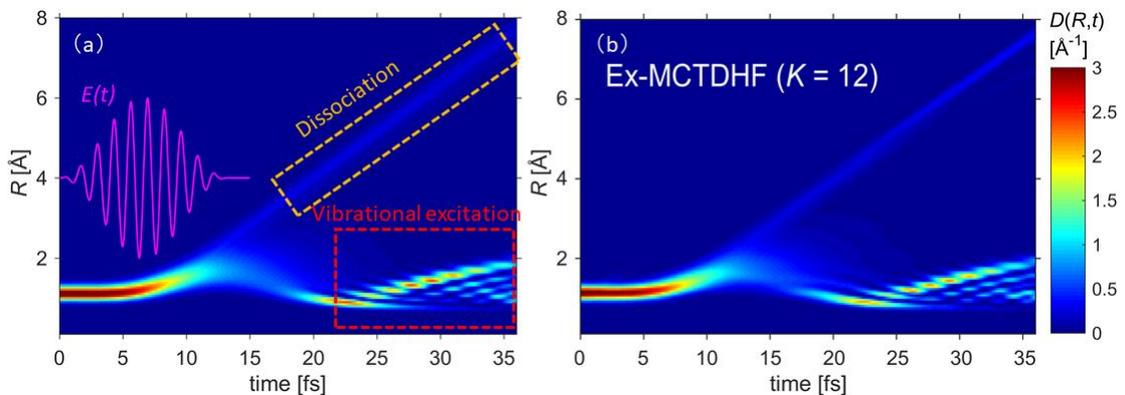


図 6: H_2^+ の光励起に伴う核波束運動 [14] (a) は厳密計算、(b) は EX-MCTDHF 法による計算 (12 個の電子軌道を使った場合)。(b) の計算結果は (a) の計算結果を良く再現する。励起レーザー場： $\lambda = 400 \text{ nm}$ 、 $I = 5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 、FWHM = 13 fs。

HeH⁺が生成することを示した[21,25]。さらに H₂He⁺分子の回転振動運動に関する共鳴状態を計算し、複素スケールリング法を用いて、200 個の共鳴状態を見出しその寿命を求めた[17]。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（5年間の総計 83 件）

- [1] S. Fukahori, T. Matsubara, Y. Nabekawa, K. Yamanouchi, K. Midorikawa, *J. Phys. B*, *in press*.
- [2] Q. Zhang, S. Fukahori, T. Ando, R. Kanya, A. Iwasaki, T. Rathje, G. G. Paulus, K. Yamanouchi, *J. Chem. Phys.*, *in press*.
- [3] K. Sakaue, H. Motoyama, R. Hayashi, A. Iwasaki, H. Mimura, K. Yamanouchi, T. Shibuya, M. Ishino, T.-H. Dinh, H. Ogawa, T. Higashiguchi, M. Nishikino, R. Kuroda, *Opt. Lett.*, *in press*.
- [4] Y. Zhang, E. Lötstedt, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **101**, 053412 (2020).
- [5] E. Lotstedt, T. Szidarovszky, F. H. M. Faisal, T. Kato, K. Yamanouchi, *J. Phys. B*, **53**, 105601 (2020).
- [6] S. Egawa, H. Motoyama, A. Iwasaki, G. Yamaguchi, T. Kume, K. Yamanouchi, H. Mimura, *Opt. Lett.*, **45**, 515 (2020).
- [7] Y. Fu, E. Lötstedt, H. Li, S. Wang, D. Yao, T. Ando, A. Iwasaki, F. H. M. Faisal, K. Yamanouchi, H. Xu, *Phys. Rev. Res.*, **2**, 012007 (2020).
- [8] T. Ando, E. Lötstedt, A. Iwasaki, H. Li, Y. Fu, S. Wang, H. Xu, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 203201 (2019).
- [9] T. Nishi, E. Lötstedt, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **100**, 13421 (2019).
- [10] H. Motoyama, A. Iwasaki, Y. Takei, T. Kume, S. Egawa, T. Sato, K. Yamanouchi, H. Mimura, *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 241102 (2019).
- [11] T. Ando, A. Iwasaki, K. Yamanouchi, *Mol. Phys.*, **117**, 1732-1740 (2019).
- [12] Y. Zhang, E. Lötstedt, K. Yamanouchi, *J. Phys. B*, **52**, 055401 (2019).
- [13] H. Li, M. Hou, H. Zang, Y. Fu, E. Lötstedt, T. Ando, A. Iwasaki, K. Yamanouchi, H. Xu, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 13202 (2019).
- [14] E. Lötstedt, T. Kato, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **99**, 013404 (2019).
- [15] S. Fukahori, K. Yamanouchi, G. G. Paulus, *J. Phys. B*, **52**, 015601 (2018).
- [16] T. Ando, A. Iwasaki, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 263002 (2018).
- [17] D. Papp, A. G. Császár, K. Yamanouchi, T. Szidarovszky, *J. Chem. Theory Comput.*, **14**, 1523–1533 (2018).
- [18] T. Ando, A. Shimamoto, S. Miura, A. Iwasaki, K. Nakai, K. Yamanouchi, *Commun. Chem.*, **1**, 1–7 (2018).
- [19] H. Xu, E. Lötstedt, T. Ando, A. Iwasaki, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **96**, 041401 (2017).
- [20] Y. Zhang, E. Lotstedt, K. Yamanouchi, *J. Phys. B*, **50**, 185603 (2017),
- [21] T. Szidarovszky, K. Yamanouchi, *Mol. Phys.*, **115**, 1916–1926 (2017).
- [22] R. Kanya, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **95**, 033416 (2017).
- [23] K. Ishida, Y. Morimoto, R. Kanya, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **95**, 1–6 (2017)
- [24] S. Fukahori, T. Ando, S. Miura, R. Kanya, K. Yamanouchi, T. Rathje, G. G. Paulus, *Phys. Rev. A*, **95**, 053410 (2017)
- [25] T. Szidarovszky, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **94**, 063405 (2016).
- [26] K. Yamada, A. Iwasaki, T. Sato, K. Midorikawa, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. A*, **94**, 053414 (2016).
- [27] H. Motoyama, T. Sato, A. Iwasaki, Y. Takei, T. Kume, S. Egawa, K. Hiraguri, H. Hashizume, K. Yamanouchi, H. Mimura, *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 051803 (2016).
- [28] E. Lötstedt, T. Kato, K. Yamanouchi, *J. Chem. Phys.*, **144**, 154111 (2016).
- [29] H. Xu, E. Lötstedt, A. Iwasaki, K. Yamanouchi, *Nat. Commun.*, **6**, 8347 (2015).
- [30] Y. Morimoto, R. Kanya, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 123201 (2015).

〔学会発表〕（5年間の総計 287 件）

〔図書〕（5年間の総計 6 件）

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)連携研究者

連携研究者氏名：加藤 毅、帰家令果、岩崎純史、LÖTSTEDT, Erik、廣井卓思、山田佳奈、安藤俊明、本山央人、佐藤堯洋、中井克典、Tamás Szidarovszky、深堀信一、西 孝哲、ZHANG, Qiqi、ZHANG, Youyuan、高 翔

ローマ字氏名：KATO, Tsuyoshi、KANYA, Reika、IWASAKI, Atsushi、HIROI, Takashi、YAMADA, Kana、ANDO, Toshiaki、MOTOYAMA, Hiroto、SATO, Takahiro、NAKAI, Katsunori、FUKAHORI, Shinichi、NISHI, Takanori、KOH, Sho