

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22245004

研究課題名(和文)分子運動量子状態のデザインと再構築

研究課題名(英文)Design and reconstruction of quantum states of molecular motion

研究代表者

大島 康裕(OHSHIMA, Yasuhiro)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授

研究者番号：60213708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,300,000円、(間接経費) 11,190,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、分子特有の運動自由度である振動と回転に着目して、最も基本的な物理学的実存である波動関数を実験的に決定する方法を確立し、さらに、量子状態をデザイン通りに作り出す制御技術の獲得を目的とした。本研究を通じて、1)新しい配置のイオンイメージング測定システムを構築し、右もしくは左に回転する波動関数の実時間発展の追跡に成功、2)コヒーレント状態分布移動の新技术としてチャープパルスを利用した非共鳴誘導ラマン分光を提案、当分光法を実現しうる新奇コヒーレント光源を制作、3)ベンゼンと水素よりなるクラスターについて高分解能電子スペクトルにより大規模な内部運動の詳細を解明、という一連の成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This project has aimed to establish the experimental reconstruction of wave functions pertinent to the degrees of motion characteristic to molecules, i.e., vibration and rotation, and to develop the control technology for creating molecular quantum states as designed. We have made the following achievements: (1) construction of an ion-imaging setup with new configuration and successful application to real-time tracking of propagation of unidirectionally rotating wave packets, (2) proposal of a new coherent population transfer method based on non-resonant stimulated Raman excitation with frequency-chirped pulses and development of a novel nanosecond pulsed light source to realize the new method, and (3) detailed examination of intermolecular motion in clusters with benzene and hydrogen molecules by adopting high-resolution electronic spectroscopy.

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：原子・分子物理 物理化学 分子分光学 強レーザー場科学 フェムト秒化学 コヒーレント制御

### 1. 研究開始当初の背景

紙の上書いた分子式は分子の骨組みだけを教えてくれるが、実際の分子は激しく運動する存在である。20世紀初頭の量子力学の成立を通じて、分子の運動に対する真に適切な物理学的描像が確立され、今では、どのような基本的教科書でも、分子の振動や回転運動を記述する物理的実存、つまり、波動関数について記載がないものは存在しない。

一方、波動関数や状態確率分布を実験的に決定すること＝「量子状態の再構築」がどの程度実現しているか顧みると、振動自由度が1次元のみであればスペクトルの逆変換より波動関数の再構築が可能であり、長い研究の蓄積があるが、複数の振動自由度が存在する場合、スペクトルの逆変換は不可能である。また、回転運動では状態確率分布の可視化が可能となったが、波動関数自体の再構築は当研究グループが2008年に報告するまで実現されていなかった。固体や表面における電子の運動に関しては状態密度の多次元的可視化が行われている。多次元の振動・回転運動を行う分子について量子状態の再構築法を確立し、激しく運動する分子の様をありありと視覚化することが希求されているのが、研究開始当時の状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、既に確立している回転量子波束の再構築法を発展させ、さらに、十分な時間分解能を持って3次元実空間で状態確率分布の時間発展を追跡しうる「時空間4次元イメージング法」を開発し、分子の振動・回転に関する量子状態の再構築技術を確立することを、第1の目的とした。さらに、再構築技術を利用することによって詳細にモニターしながら、「量子状態をデザインどおりに作り出す制御技術」の確立を行うことを第2の目的として設定した。ここでは、通常の光学過程では実現が極めて困難なエキゾチックな運動状態、例えば、構造異性化を効率的かつ選択的に誘起する波束や、強く結合した複数自由度系において長時間局在を持続する波束、等の生成と検出を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 時空間4次元イメージング法の開発

本研究では、分子の超高速波束ダイナミクスを観測するために、荷電粒子の画像観測法を適用した。画像観測法の典型的な実験では、レーザーを分子に照射し、生じたイオンや光電子を2次元検出器(MCP + スクリーン + カメラ)に向かって加速し、その空間分布を2次元射影として画像化する。ここで、実際の荷電粒子は、一般には3次元的に分布してお

り、観測した2次元画像から3次元の情報を引き出すためには、数学的処理が必要となつて、空間分布が軸対称であることなどの条件が課され、実験データの質や実験の配置がしばしば制限されてきた。3次元分布を(2次元の位置座標) + (到達時間)として直接測定する手法(3次元画像観測)を用いれば上記の制限は解決されるが、2次元計測に比べて測定効率や画像情報の精度が低く、かつ装置が高額であるというデメリットがあった。本研究では既存の手法を根本から見直し、設計を繰り返す中で、2次元検出器を用いながら、3次元分布の情報を余分な演算なしに抽出しうる、独自の画像観測装置のデザインを着想し、実用化するに至った。

具体的な構成としては、図1に示す通りに、New windowの位置に2次元検出器(MCP/スクリーン/カメラ)と、対向する平行平板パルス電極を設置したものである。超音速ジェット中の $N_2$ 分子にフェムト秒レーザー(400 nm, 100 fs, 0.3 mJ)を照射し、クーロン爆発過程で生じた $N^{m+}$ イオンを光の進行と垂直方向に加速した。目的イオンが検出器前方に到達した時点で高速パルス高電圧を電極に印加し、初期加速方向と直交した電場によって検出器に射影した。スクリーン上の蛍光画像をレンズカップルしたUSBカメラによって撮像した。画像データはPCに転送され、画像処理により、イオン由来の輝点の重心座標のみが抽出・記録される。50,000イオン程度の信号を積算し、分子の空間分布の測定とした。回転波束イメージングについては、上記クーロン爆発イメージングを円偏光で行うことで全角度方向の分子をモニターできるprobeとし、波束を生成する直線偏光pumpパルス(800 nm, 120 fs, 0.18 mJ)やパルス列と組み合わせ、pump照射後空間分布の変化を追跡するpump-probe実験を行った。

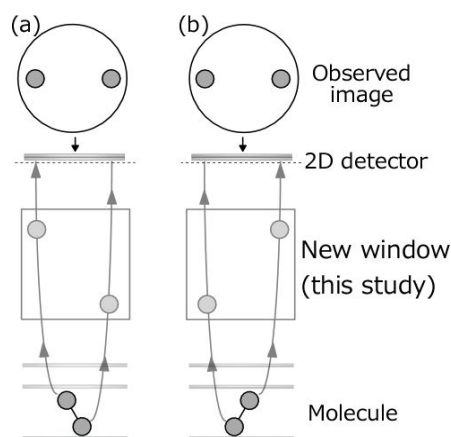


図1：典型的な画像観測（上方の検出器利用）および本研究で提案する手法の模式図。回転制御、イオン化用レーザーは紙面に垂直に入射し、回転面は紙面となる。New windowの導入により、(a)、(b)両者を区別しうる画像観測が可能である。

## (2) 新規コヒーレント光源の開発

デザイン通りに分子運動の量子状態を作り出す制御技術の基盤として、光と物質間のコヒーレントな相互作用のパラメータを断熱的に変化させることにより、量子状態間の分布移動を行う断熱透過法を利用することとした。断熱透過法の一形態であるチャープ断熱ラマン透過(CARP)を実現するために、新規狭帯域ナノ秒光源の開発を行った。研究対象とする気相中の分子では、振動や回転のエネルギーは数~数千  $\text{cm}^{-1}$  程度であり、さらに簡単な分子であっても回転構造を分解するためには1 GHz以下の分解能を持った光が必要とされる。パルス幅としてはフーリエ変換の関係から数 ns以上となる。またラマン過程を起こすためには  $\text{MV/cm}$  以上の電界強度が必要となる。これらの要請全てを満足するために、単一縦モードのシード光を位相変調し、時間的に切り出すことでチャープパルスとして、さらに、光パラメトリック増幅(OPA)を用いて必要なレベルまで出力を増幅するというシステム構成を採用した。ここでは、チャープを歪ませることなくパルス増幅するために、高い利得を実現しやすい光パラメトリック発振器(OPO)ではなく、共振器を持たないOPAを用いることとした。ナノ秒OPAの利得は、励起パルスの尖頭値の低さ、パルス幅の長さによる損傷閾値の低下により、超短パルスレーザーに比べ相対的に低い値に限定されてしまう。さらにシードとして cw 光を使うことは初期値が小さいことを意味する。これらの問題を克服するために、外部共振器半導体レーザー(ECDL)の出力に対して位相変調を応用して周波数チャープをほどこした後、Yb 添加ファイバー(YDFA)によって前置増幅することで、最終増幅器であるOPAの光学系と結晶の負担を軽減することとした。

図2に、製作したレーザーシステムの概略を示す。このOPAではNd:YAG第二高調波を励起光源としており、ECDLからの単一縦モードの出力を縮退近辺でシグナルもしくはアイドラーにシード光として注入することで、目的とする分子のラマン遷移の周波数差を持った2色のパルスが同時に得られる。シード光には、パルス的にRFを印加した音響光学変調器(AOM)の一次回折光を用いる。得られたパルス状のシード光は、電気光学変調器(EOM)に入射して位相変調することで、周波数チャープを加える。AOMおよびEOMへのRF信号は励起レーザーの発振繰り返しと同期されている。位相変調により周波数 $\omega_0$ の光は $[\omega_0 + m \sin(\omega_m t + \phi_m)]$ と周波数変調を受ける。ここで $m$ は変調深さ、 $\omega_m$ は変調波の周波数、 $\phi_m$ は変調波の相対位相である。変調波は、光パルスの中心と原点を同じくする正弦波を用い、 $\omega_m$ は光パルスの半値全幅の逆数より幾分大きな値にする。位相変調された光は、975 nm 半導体レーザー(LD)励起のYb 添加ファイバーによって増幅される。最

終的にOPAにより増幅された光の変調の程度の測定は、光ヘテロダイン(OH)検出により行う。すなわちOPA出力をビームスプリッターに導いて変調前のシード光をAOM2により周波数シフトさせた一次回折光と合流させ、高速フォトダイオード(PD)によりこれら二つの光のビート信号を測定する。シングルショットで変調を測定するためには、1パルス中に2回以上のビートを観測する必要がある。本光源のパルス幅は8 ns程度のため、周波数シフトは800 MHzと設定した。

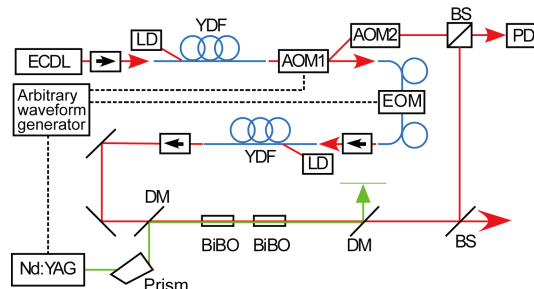


図2：ナノ秒チャープパルス光源の概略図

## 4. 研究成果

### (1) 時空間4次元イメージング法の開発

開発した実験装置の性能評価のため、まず、 $\text{N}_2$ 分子のクーロン爆発イメージングの観測を行った。図3にクーロン爆発で生じた $\text{N}^{3+}$ の画像を示す。原子イオンが偏光方向に放出されていること、360度にわたり、全方向の分子を観測できていることが分かる。

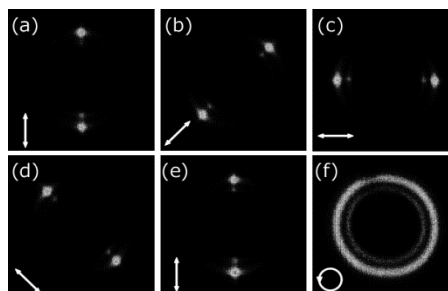


図3：ランダムに配向した $\text{N}_2$ 分子に対するクーロン爆発( $\text{N}^{3+}$ )画像。照射したレーザー光の偏光状態を合わせて示す。

引き続き、 $\text{N}_2$ 分子の回転波束イメージングの観測を行った。図4に $\text{N}_2$ の回転波束ダイナミクスのスナップショット(一部)を示す。ここでは、角度に依存した輝度情報を極座標で表示している。Pump光照射前(-2001 fs)は等方的(円)であった空間分布が、回転波束生成によって時間的に変化していることが観測された。ある周期で分子軸の整列する様子を示しており、3次元計測を用いた先行実験に類似の結果となっているが、イメージのS/Nは大きく改善されている。

図4のダイナミクスは1発の直線偏光pump光に誘起されるものであり、左右の回

転が同程度に含まれているため、古典的回転のように認識できない。分子の回転制御について、複数パルスを適切な時間差と偏光状態で照射することで、回転方向を含めた高度な波束制御が可能である。実際に、右回りもしくは左回りの古典的な回転に対応する量子波束の生成と観測にも成功しており、現在、その成果を投稿論文としてまとめている。

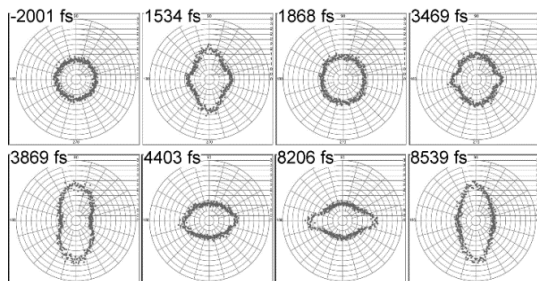


図4：直線偏光 pump パルスに誘起された  $N_2$  分子回転波束ダイナミクスのスナップショット例。Pump 光の偏光は図の上下方向である。

## (2) 新規コヒーレント光源の開発と応用

開発した新規コヒーレント光源において位相変調を加えない場合（図5中央）は、周波数の半値全幅として 69 MHz が得られた。この値は、7.4 ns パルスの FT 限界である 60 MHz とほぼ等しく、歪の少ない増幅が行われていることが確認できた。変調周波数 45 MHz、 $m = \pi$  の変調では、300 MHz の周波数チャープを確認でき、また、位相変調とパルス切り出しのタイミングにより down/up チャープを作り分けることができた（図5左および右）。チャープの最大値としては、現在の OH の周波数シフトから制限される周波数帯域である 10 ns あたり 600 MHz まで確認できている。

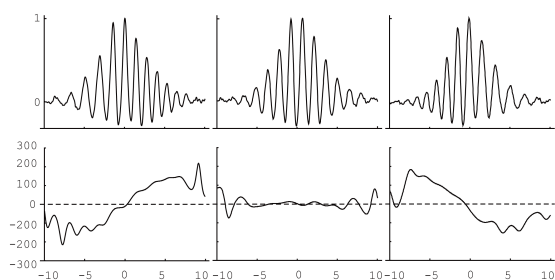


図5：OPA 出力の OH 信号(上)と瞬時周波数変化

さらに、この新規光源を利用したコヒーレント量子状態操作について、理論的な検討を加えた。本 OPA 光源では、エネルギー差が  $0-400 \text{ cm}^{-1}$  の範囲となるシグナル光とアイドラー光を出射することができる。この両者に図5のような適切な周波数チャープを施して誘導ラマン散乱過程を誘起すれば、始状態から終状態へ完全に分布を移動することができることを、光学 Bloch 方程式を数値的に解くことによって確認した。特に、パルス光強度が 10 倍程度変動しても分布移動の効率は影響を受けないことが示され、CARP 法が極めてロバストな手法であることを定量的

に明らかにすることができた。

また、当 OPA の増幅バンド幅は  $20 \text{ cm}^{-1}$  であり、この範囲にある複数のシード光を同時に増幅可能であることを活用した、高度な分布操作についても理論的に考察を加えた。つまり、多段階の誘導ラマン散乱を単一のナノ秒パルス内で実現することが可能であり、実際に、 $J=0 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$  というプロセスでは初期分布の 90% を最終状態へ移動できることが示された（図6）。

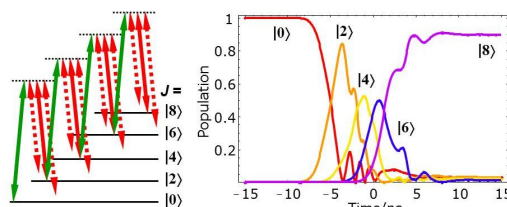


図6：CARP による回転多段階励起

さらに、当 OPA においては 40 GHz までの位相変調が実現でき、変調サイドバンドとキャリアの相対位相を変調用のマイクロ波に精密に同調することが可能である。そこで、図7左に示すように、誘導ラマン散乱過程とマイクロ波による電気双極子遷移の量子干渉を引き起こすことができると期待される。数値計算によれば、図7右で示すように、2つの光学異性体間で全く反対の干渉効果が表れ、ほぼ完全な光学分割が実現できることが明らかになった。

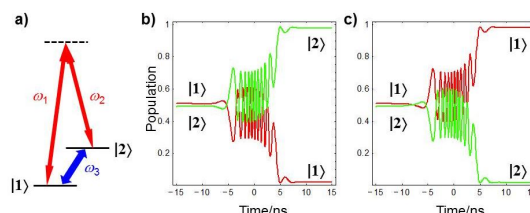


図7：量子干渉による光学異性体分割

## (3) 高分解能電子スペクトル測定による大規模構造変化運動の研究

分子の運動として最も興味深い対象の1つが、大きな構造変化を引き起こすような大振幅振動である。分子クラスターは、このような運動自由度を持つ系の典型である。例えば、 $H_2(D_2)$  を含むクラスターにおいては分子間結合の異方性が小さく、 $H_2(D_2)$  はほぼ自由に内部回転すると期待される。この場合、2つの原子核の入れ替わりが可能となることから、合成核スピンの  $I=1(2,0)$  のオルソと  $I=0(1)$  のパラの2種類の核スピン異性体が存在することになる。これまでに、小サイズ分子と水素分子とのクラスターについては多数の研究が行われているが、芳香族とのクラスターの研究は極めて限られており、内部回転についての解析も行われていない。我々はベンゼンと  $H_2$  および  $D_2$  のクラスターの観測に成功し、分子間

振動の測定および解析を行い、内部回転に関する知見を得た。

実験は、質量選別二波長光イオン化を用いて、ベンゼンモノマーの  $S_1 \leftarrow S_0$   $6_0^1$  バンド領域で、クラスターの振電スペクトルを高分解能で観測した。He 中 7~30% に希釈した  $H_2$  もしくは  $D_2$  に、ベンゼン (80 torr) を混合した試料を用いた。この試料ガスを 35~50 気圧の押圧でパルスバルブより真空槽内に噴出し、超音速ジェット中にクラスターを生成させた。 $S_1 \leftarrow S_0$  遷移の励起には単一縦モードのナノ秒パルスを用いた。 $S_1$  状態に励起されたクラスターは、通常の色素レーザーからの出力を照射してイオン化させ、TOF 質量分析器で検出した。

$H_2$  とのクラスターでは、パラおよびオルソ水素に対応する 2 つの異性体由来するバンドを観測した。ノーマル水素を利用した場合にはオルソ種のみが観測され、パラ種の検出には純パラ水素試料を用いる必要があった。よって、オルソ種に比べてパラ種の方が、実効的な結合エネルギーが小さいものと考えられる。モノマーの  $S_1 \leftarrow S_0$   $6_0^1$  に対応するバンドの他に、分子間振動励起状態への振電バンドも観測された (オルソ種で 3 つ、パラ種では 1 つ)。  $D_2$  のクラスターにおいても同様に 2 つのスピニ異性体が検出された。この場合は、ノーマル  $D_2$  を用いた実験でも、結合エネルギーが小さいオルソ種を弱いながらも観測することができた。振電バンドとしては、パラ種で 3 つ、オルソ種で 2 つが観測された。4 つの分子種全てのバンドにおいて高分解能測定を行い、対称コマの垂直タイプの遷移であることを確認するとともに、分光定数を精度よく決定した。全ての振動数を矛盾なく説明するように振電バンドの帰属を行い、オルソ  $H_2$  (パラ  $D_2$ ) 種の 3 つのバンドは、低波数サイドから順に、分子間伸縮・分子間変角とねじれ振動の結合音・分子間変角の倍音の励起状態への遷移と確定した。 $S_1 \leftarrow S_0$   $6_0^1$  からのシフト量より、伸縮・変角・ねじれの 3 つの分子間モード全てについて、基本振動数を決定することができた。このうち、ねじれ振動数は、ほぼ自由回転している  $H_2$  ( $D_2$ ) の  $j=1, m=0$  状態と  $j=1, m=\pm 1$  状態との間のエネルギー差に相当する。実測値を再現するように内部回転のポテンシャル障壁を求めたところ、 $H_2$ ,  $D_2$  に対してのおの  $-66, -72 \text{ cm}^{-1}$  であると決定された。ほぼ類似の値ではあるが若干異なるのは、他の分子間モードのゼロ点振動の効果によると考えられる。

また、全てのクラスターにおいて、各遷移の線幅は装置分解能より有意に大きく、励起状態において振動前期解離などの緩和過程が存在することが示された。この結果は、ポンププローブ法による寿命測定からも確認された。

## 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 15 件)

C. Niida, M. Nakajima, Y. Sumiyoshi, Y. Ohshima, H. Kohguchi, and Y. Endo, "FTMW spectroscopy and determination of the 3-dimensional potential energy surface for Ar-CS," J. Chem. Phys. **140**, 104310-1-8 (2014). 査読あり, DOI: 10.1063/1.4867972

M. Kondoh, Y. Ohshima, and M. Tsubouchi, "Ion effects on the structure of water studied by terahertz time-domain spectroscopy," Chem. Phys. Lett. **591**, 317-322 (2014). 査読あり, DOI: 10.1016/j.cplett.2013.11.055

M. Hayashi and Y. Ohshima, "Sub-Doppler electronic spectra of the benzene-( $H_2$ )<sub>n</sub> complexes," J. Phys. Chem. A **117**, 9819-9830 (2013). 査読あり  
DOI:10.1021/jp312754v

M. Hayashi and Y. Ohshima, "Sub-Doppler electronic spectra of the benzene-(He)<sub>n</sub> complexes," Chem. Phys. **419**, 131-137 (2013). 査読あり  
DOI: 10.1016/j.chemphys.2013.02.022

M. Nakajima, H. Toyoshima, S. Sato, K. Tanaka, K. Hoshina, H. Kohguchi, Y. Sumiyoshi, Y. Ohshima, and Y. Endo, "Electronic spectroscopy of the HCCN radical," J. Chem. Phys. **138**, 164309-1-10 (2013). 査読あり, DOI: 10.1063/1.4802003

S. Miyake and Y. Ohshima, "Injection-seeded optical parametric amplifier for generating chirped nanosecond pulses," Opt. Express **21**, 5269-5274 (2013). 査読あり  
DOI: 10.1364/OE.21.005269

H. Akagi, T. Kasajima, T. Kumada, R. Itakura, A. Yokoyama, H. Hasegawa, and Y. Ohshima, "Isotope-selective ionization utilizing molecular alignment and non-resonant multiphoton ionization," Appl. Phys. B **109**, 75-80 (2012). 査読あり  
DOI: 10.1007/s00340-012-5222-3

M. Tsubouchi, M. Nagai, and Y. Ohshima, "Terahertz tomography of photo-induced carrier based on pump-probe spectroscopy in counter-propagation geometry," Opt. Lett. **37**, 3528-3530 (2012). 査読あり  
DOI: 10.1364/OL.37.003528

A. Mizoguchi, Y. Ohshima, and Y. Endo, "The study for the incipient solvation process of NaCl in water: the observation of the NaCl-( $H_2O$ )<sub>n</sub> ( $n = 1, 2$ , and 3) complexes by using Fourier-transform microwave spectroscopy," J. Chem. Phys. **135**, 064307-1-11 (2011). 査読あり  
DOI: 10.1063/1.3616047

D. Baek, H. Hasegawa, and Y. Ohshima, "Unveiling the nonadiabatic rotational

excitation process in a symmetric-top molecule induced by two intense laser pulses,” *J. Chem. Phys.* **134**, 224302-1-10 (2011). 査読あり, DOI: 10.1063/1.3598962  
Y. Khodorkovsky, K. Kitano, H. Hasegawa, Y. Ohshima, and I. Sh. Averbukh, “Controlling the sense of molecular rotation: Classical vs quantum analysis,” *Phys. Rev. A*, **83**, 023423-1-10 (2011). 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevA.83.023423  
Y. Ohshima and H. Hasegawa, “Coherent rotational excitation by intense nonresonant laser fields,” *Int. Rev. Phys. Chem.* **29**, 619-663 (2010). 査読あり  
DOI: 10.1080/0144235X.2010.511769  
Y. Sumiyoshi, I. Funahara, K. Sato, Y. Ohshima, and Y. Endo, “Three-dimensional intermolecular potential energy surface of the Kr-OH complex,” *Mol. Phys.* **108**, 2207-2218 (2010). 査読あり  
DOI: 10.1080/00268976.2010.499378  
R. Itakura, H. Hasegawa, Y. Kurosaki, A. Yokoyama, and Y. Ohshima, “Coherent correlation between nonadiabatic rotational excitation and angle-dependent ionization of NO in intense laser fields,” *J. Phys. Chem. A*, **114**, 11202-11209 (2010). 査読あり  
DOI: 10.1021/jp102840t  
Y. Sumiyoshi, I. Funahara, K. Sato, Y. Ohshima, and Y. Endo, “Microwave spectroscopy of the Ne-OH(<sup>2</sup>Π<sub>i</sub>) complex and three-dimensional intermolecular potentials,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12**, 8340-8349 (2010). 査読あり  
DOI: 10.1039/C002193H

[学会発表](計 60 件)

Y. Ohshima, “Coherent excitation of molecular motion by intense ultrashort pulses,” *IMS Workshop on "Hierarchical Molecular Dynamics: From Ultrafast Spectroscopy to Single Molecule Measurements"*, IMS, Okazaki, Japan, 2013.5.25-26. (Invited)  
大島康裕, 高強度レーザー場によって誘起される分子振動・回転のコヒーレント光ダイナミクス, 第6回分子科学討論会, 東京大学, 東京都文京区, 2012.9.18-22. (招待講演)  
Y. Ohshima, “Time- and frequency-domain investigation of intermolecular vibration in gas-phase molecular clusters,” *Gas phase spectroscopy symposium*, KAIST, Deajeon, Korea, 2012.8.20-21. (Invited)  
Y. Ohshima, “Coherent excitation of molecular motion by intense ultrafast laser pulses,” *IMS Japan - WIS Workshop*, Rehovot, Israel, 2012.2.25. (Invited)  
Y. Ohshima, “Spinning and deforming gas-phase molecules by intense ultra-short

laser pulses,” *The 14th Asian Chemical Congress 2011*, Bangkok, Thailand, 2011.9.5-8. (Invited)  
Y. Ohshima, “Quantum-state manipulation of molecular rotation and vibration,” *2011 Korea Japan Symposium on Molecular Science*, Pusan, Korea, 2011.7.5-8. (Invited)  
Y. Ohshima, “Intermolecular vibrational dynamics of molecular clusters investigated by frequency- and time-domain spectroscopy,” *PACIFICHEM 2010*, Honolulu, Hawaii, USA, 2010.12.15-20. (Invited)  
Y. Ohshima, “Spinning and deforming gas-phase molecules by intense ultra-short laser pulses,” *The Oversea Sokendai Lecture*, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2010.10.20. (Invited)

[図書](計 1 件)

大島康裕, 分子の振動・回転状態、光と分子、大学院講義 物理化学(第2版) I. 量子化学と分子分光学(染田清彦 編) 東京化学同人(2013年)

[その他]

- (1) 分子科学研究所 研究者詳細 大島康裕  
<http://www.ims.ac.jp/research/prof/ohshima.html>
- (2) 分子科学研究所 大島グループ  
<http://www.ims.ac.jp/research/group/ohshima/>
- (3) 大島グループ ホームページ  
[http://groups.ims.ac.jp/organization/ohshima\\_g/index.html](http://groups.ims.ac.jp/organization/ohshima_g/index.html)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
大島 康裕 (OHSHIMA, Yasuhiro)  
分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授  
研究者番号: 60213708
- (2) 研究分担者  
長谷川 宗良 (HASEGAWA, Hirokazu)  
東京大学・総合文化研究科・准教授  
研究者番号: 20373350  
水瀬 賢太 (MIZUSE, Kenta)  
分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教  
研究者番号: 70613157  
(平成23年度より研究分担者として参画)