

令和元年6月4日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03761

研究課題名(和文)電子波動関数の核配置依存性に基づくアプローチによる振電相互作用効果の研究

研究課題名(英文) A study of vibronic effects: investigation on the deformation of electronic wavefunctions caused by molecular vibration

研究代表者

渡邊 昇 (Watanabe, Noboru)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：90312660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：分子振動と電子運動の相関である振電相互作用が、様々な反応過程で重要な役割を果たすことが知られている。本研究では、核変位にともなう"電子波動関数の変化"という独自のアプローチから振電相互作用研究を展開すべく、分子振動による分子軌道の歪みを高速電子衝撃イオン化実験により可視化する手法を確立した。さらに、電子エネルギー損失分光を用いて、そうした波動関数の形状変化が電子励起過程に与える影響を明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子の反応性が特定の分子軌道の形状に支配されることは良く知られているが、それら軌道は実際には分子振動により刻々と変化している。軌道形状の変化は分子の反応性に影響を与えるだろう。特に、多くの分子が振動励起しているプラズマ中や惑星大気中などの高温環境下において、その効果はより顕著となる。分子振動に伴う電子波動関数の歪みを可視化した本研究は、多様な環境下における反応の理解に資するとともに、新たな振電相互作用概念の創出に向けた貴重な一歩になるものと信じる。

研究成果の概要(英文)：Coupling between electronic and nuclear motion in molecule plays important roles in various reaction processes. To investigate the vibronic effects, we have developed a method to visualize the deformation of electronic wave functions caused by molecular vibration using high-energy electron-impact ionization experiments. Furthermore, electron energy loss spectroscopy studies have been performed to elucidate how the electronic excited states are coupled to each other via molecular vibration and how the coupling affects electronic transition probabilities.

研究分野：物理化学

キーワード：原子・分子物理 電子分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分子振動と電子運動との相関である振電相互作用が、分子の関与する種々な物理・化学現象においてしばしば重要な役割を果たすことが知られている。光学スペクトルに現れる禁制線の存在が、その端的な例といえよう。禁制線の出現は、原子核の変位に伴う電子波動関数の歪みにより選択則の破れが生じた結果である。さらに本効果は分子の振動状態に強く依存することから、その影響は分子の多くが振動励起しているプラズマ中や上層大気中における化学反応を理解する上での鍵ともなっている。

これら重要性から、振電相互作用は多くの研究者の興味を集めてきた。中でも、Herzberg と Teller の理論に則り禁制遷移を解析する分光学的アプローチによる研究が、国内外のグループにより活発に報告されてきている。スペクトル線の帰属に主眼を置くそれら分光研究は、光吸収スペクトルを通して電子波動関数の歪み効果を間接的に調べたものと云えよう。一方、核配置に依存した電子波動関数の変化こそが振電相互作用の本質であることを考えれば、波動関数の歪みそのものを直接見ることの意義は計り知れない。すなわち、“電子波動関数形状からのアプローチに基づく振電相互作用研究”の提案である。

2. 研究の目的

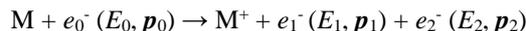
本研究の目的は、これまで実験的な観測が困難であった“電子波動関数の歪み”に焦点を定め、高速電子の非弾性散乱実験に基づく分子軌道イメージング法を駆使した独自の振電相互作用研究を展開することにある。

分子の反応性がフロンティア軌道のかたちに強く支配されることが知られているが、実際には分子振動によりそれら軌道は常に変化している。軌道形状の変化は分子の反応性に影響を与えるだろう。電子波動関数の歪みが分子物性に与える影響を解明する技術基盤を構築できれば、化学反応や分子認識の理解に質的变化をもたらし得る。そこで本研究では、以上の目的達成に向け、核配置に依存した分子軌道形状の変化を可視化する手法の確立を目指した。

また、光や荷電粒子との相互作用によって誘起される分子内電子励起は様々な化学反応の出発点となっているが、その過程において振電相互作用が重要な役割を果たす。一例を挙げれば、分子の電子励起はプラズマ中や惑星大気中における様々な反応の引き金となっており、その励起確率は振電相互作用により変化する。そこで、分子の電子励起過程にも研究を展開し、波動関数の歪みが電子励起過程に与える影響を明らかにして行く。

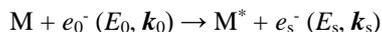
3. 研究の方法

分子軌道のイメージング法として、本研究では電子運動量分光 (EMS) を用いた。電子線コンプトン散乱実験の発展形である EMS では、電子衝撃イオン化により生成した電離電子 e_1^- と非弾性散乱電子 e_2^- とを同時計測する。



散乱前後のエネルギー保存則から標的電子の束縛エネルギー $E_{\text{bind}} (=E_0 - E_1 - E_2)$ が、また運動量保存則から標的電子が電子衝突以前にもっていた運動量 $p (=p_1 + p_2 - p_0)$ がわかる。散乱理論によれば、EMS 断面積 (σ_{EMS}) は標的電子が属していた分子軌道 $\varphi(r)$ のフーリエ変換の二乗振幅 (即ち、電子運動量分布) に比例するため、運動量空間において個々の分子軌道形状を可視化できる。この原理に基づき、電子運動量分布を精密測定することで、分子軌道形状に対する分子振動の影響を調べた。さらに室温での実験に加え、電子波動関数の歪みがより顕著となる振動励起分子を対象とした研究を実現すべく、高温分子ビーム源の開発もあわせて行っている。

一方、分子振動に伴う電子波動関数の変形が電子励起に及ぼす影響の調査には、電子エネルギー損失分光 (EELS) を用いた。EELS では、標的分子との衝突により散乱された電子の強度分布を、散乱前後のエネルギー変化である損失エネルギー $E (=E_0 - E_s)$ と運動量変化である移行運動量 $K (=k_0 - k_s)$ の関数として測定する。



電子散乱断面積 σ_{EELS} は標的電子波動関数の形を反映した特徴的な移行運動量依存性を示すため、その分布形状から分子振動による励起電子波動関数の歪みをとらえることができる。例えば、平衡構造から微小核変位したときの電子波動関数は Herzberg-Teller 展開を用いて近似され、核の移動が電子波動関数に与える影響は分子振動を介した他の電子状態との結合として解釈される。仮に励起状態 A に別の状態 B が結合していれば、その σ_{EELS} は、これら二つの状態への遷移に対する強度分布の線形結合で近似的に表せるだろう。本着想に基づき、Herzberg-Teller 型振電相互作用による電子状態間の結合を視覚的に捉えた。

また、電子励起やイオン化により分子の電子状態が変われば、構成原子の感じるポテンシャルに変化が生じ、分子は構造変化や解離を起こす。この後続緩和過程をも研究対象とすべく、これまで開発を進めてきた散乱電子と解離イオンとの同時計測法 [雑誌論文#1] を発展させるとともに、基本的な分子を対象とした実験を行った。

4. 研究成果

(1) EMS を用いた分子軌道の歪み測定

軌道毎の電子運動量分布を測定することで、電子波動関数形状に対する分子振動の影響を調べた。ジメチルエーテルや四塩化炭素といった基本的な分子〔雑誌論文#6,8,9〕や大型の機能性分子であるアダマンタン〔雑誌論文#4〕、低周波大振幅振動を有するオキセタンやエタノール〔雑誌論文#5,7〕などの多様な分子を対象とすることで、振電相互作用が分子軌道形状に与える影響の統一的理解を目指した。さらに、分子振動の影響を考慮した独自の理論計算を行い、実験との比較などから個々の振動モードが電子運動量分布に与える影響を明らかにしている。

一例として、ジメチルエーテルに対する結果を示す。図1は実験より求めた $2b_1$ 最高被占有軌道の電子運動量分布と理論計算との比較である。平衡核配置を仮定した従来の理論計算（図中点線）は運動量原点 ($p=0$) 近傍で強度をかなり低く見積もっており、実験結果を説明できない。これは、分子振動にともなう $2b_1$ 軌道の歪みが運動量分布の変化として観測されたことを強く示唆している。

より詳細な解析のため、我々のグループで開発した Harmonic Analytical Quantum Mechanical (HAQM) 法に基づき、分子振動の影響を考慮した理論計算を行った。HAQM 法によれば、分子振動の影響を考慮した電子運動量分布は以下の式で表される。

$$M_j(p) = \rho_j(p, 0) + \sum_L \langle \xi_{vL}(Q_L) | \rho_j(p, Q_L \hat{q}_L) - \rho_j(p, 0) | \xi_{vL}(Q_L) \rangle$$

ここで、 $\xi_{vL}(Q_L)$ は L 番目の基準モードに対する振動の波動関数であり、 \hat{q}_L は基準座標方向の単位ベクトルを意味する。 $\rho_j(p, Q)$ は核配置 Q における j 番目の軌道の電子運動量分布である。右辺第一項は平衡核配置 ($Q=0$) における電子運動量分布に対応し、第二項が分子振動の寄与を表す。計算結果を図中に実線で示す。低運動量領域での強度が大幅に増加し、実験を良く再現するようになった。このことは、運動量原点近傍で観測された強度が分子振動に起因した $2b_1$ 軌道の歪みの反映であることを明確に示している。

HAQM 法において、分子振動の影響は個々の基準振動の寄与の和として与えられることから、それらを個別に検証できる。解析の結果、 CH_2 非対称伸縮振動と CH_2 面内変角振動が $2b_1$ 運動量分布の変化へ支配的に関与していることがわかった。以上の結果を理解するため、 $p \sim 0$ における強度変化に関して考察する。電子運動量分布は波動関数 $\varphi(\mathbf{r})$ のフーリエ変換を用いて定義されるため、運動量原点における強度は位置空間波動関数の全領域にわたる積分の二乗振幅 $|\varphi(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}^2$ に比例している。 $2b_1$ 軌道は、O 原子と二つの CH 結合間に分布しており、波動関数の符号が正の領域と負の領域とが相等しく存在する。このため、積分で打ち消しあいが生じ、 $p = 0$ で強度がゼロとなる。ところが、上記振動によって分子構造が歪むと二つの CH 結合は等価でなくなり、符号が正と負の領域間で体積差が生じる。その結果として、 $p \sim 0$ での強度増加につながったものと考えられる。

多種の分子を対象とした一連の研究より、特定の振動モードが電子運動量分布の変化にしばしば支配的に関与しており、その効果は核変位によるポテンシャルの変化に起因した分子軌道間の相互作用を考慮することで理解できることを示した。

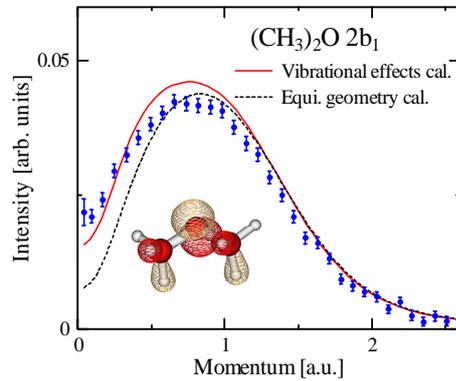


図1：ジメチルエーテルの電子運動量分布

(2) 価電子励起に対する振電相互作用効果

分子振動に伴う電子波動関数の歪みが電子励起過程に与える影響を明らかにすべく、EELS 実験を行った。ここでは、六フッ化硫黄 (SF_6) の価電子励起に対する研究結果を紹介する。

SF_6 の $1t_{1g}$ 最高被占有軌道から $6a_{1g}$ 空軌道への電子励起に伴う非弾性散乱過程に着目し、その散乱断面積を移行運動量 K の関数として求めた (図2)。本遷移に關与する $1t_{1g}$ と $6a_{1g}$ 軌道は、どちらも反転操作に対して不変な gerade 対称性を有する軌道である。図から $K=0$ において $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ が大きな励起確率をもつことが見て取れる。 K がゼロとなる前方散乱では双極子遷移が支配的となり、電子散乱断面積は光吸収断面積に比例する。ところが、gerade 対称な軌道間の遷移は双極子禁制であることから、 $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ は $K=0$ において強度を持ち得ない。実際、図中に点線で示す理

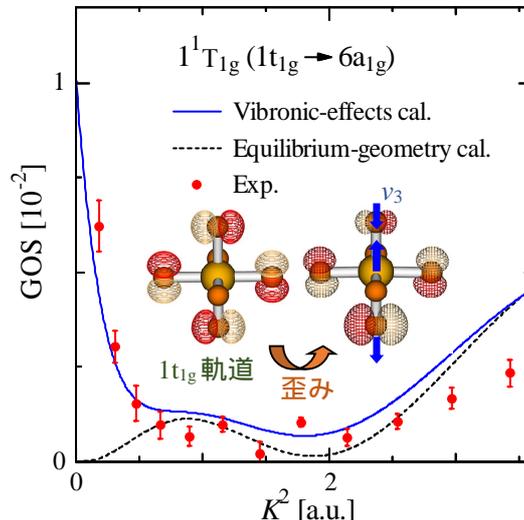


図2： SF_6 の $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ 励起に対する電子散乱断面積の移行運動量依存性

論計算はこの議論に沿った強度分布を示している。この計算では分子が平衡核配置にあることを仮定しているが、それでは実験結果を説明できないことになる。

以上の結果は、振電相互作用を考慮すれば理解できる。分子振動による構造変形により分子の反転対称性が崩れれば、パリティによる禁制則が緩和され、 $K=0$ においても電子励起が起こりうる。そこで、EMS 研究で用いた HAQM 法を拡張し、分子振動の影響を考慮した電子励起確率の計算を行った。得られた結果は実験結果をよく再現しており、分子振動が SF_6 の電子励起に重要な役割を果たしていることがわかる。

ここで、平衡核配置を仮定した理論計算との差を求めると、その K 依存性は隣接する $1t_{2u} \rightarrow 6a_{1g}$ および $5t_{1u} \rightarrow 6a_{1g}$ 励起状態への遷移に対する強度分布と類似していた。このことから、分子変形にともなうクーロンポテンシャルの変化を介してこれら近接状態が $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ 状態に結合することで、低運動量領域で強度増加が生じたことがわかる。さらに、HAQM 法に基づく理論解析から、 SF_6 がもつ六種の基準振動のうち SF 非対称伸縮振動である ν_3 モードのみが、 $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ 励起へ支配的に関与していることを突き止めた。加えて、EMS 実験からも ν_3 振動が $1t_{1g}$ 軌道へ大きな影響を与えていることを明らかにしている〔雑誌論文#8〕。これらのことから、多原子分子が有する複数の固有振動のなかでも、少数の特定モードのみが分子の性質へ支配的に関与する場合があることが示された。

以上の本結果は、電子波動関数形状に顕著な影響を与える特定振動モードの励起により、分子の性質へ大きな変化を齎し得ることを意味している。例えば SF_6 の ν_3 モードは強い赤外活性を有するため、レーザー照射により振動励起を誘起できる。これによって $1t_{1g}$ 軌道の歪みを増大させれば、 $1t_{1g} \rightarrow 6a_{1g}$ 遷移の確率を増幅できる筈である。このことは、分子振動を介した電子波動関数の変形を利用した反応制御の可能性を強く示唆している。

(3) 高温分子ビーム源の開発

室温環境で行った上記研究から、振幅の小さなゼロ点振動でさえ分子軌道形状に顕著な影響を及ぼす場合があり、それが電子励起確率を大きく変化させ得ることを見いだした。温度上昇に伴う分子の振動励起により核変位が増大すれば、電子波動関数の歪みは増幅され、高温環境下特有の性質発現へとつながるだろう。一般に電子励起過程に対する研究は室温条件で行われてきたが、室温よりも遥かに高い温度条件で進行する反応過程は多数存在する。例えば、半導体加工で用いられるプラズマエッチングにおいては反応場中の温度が $\sim 1,000$ K にも達し、分子の多くは振動励起状態にある。また、大気化学では酸素やオゾンなどの紫外線吸収で起こる電子励起をしばしば論じるが、上層大気中では多くの分子が回転・振動励起している。高温環境下における電子励起に関する知見が著しく不足している現状を考えると、電子遷移確率の温度依存性とその主因である振電相互作用効果に関する知見は、プラズマ中や上層大気中における化学反応の理解に大きく貢献する。

そこで、分子の振動状態変化が分子物性に与える影響をその起源から明らかにしておくことを目的に、振動励起分子を対象とした EMS 測定の実現に向けた装置開発を行った。各振動状態にある分子の割合はボルツマン分布に従うため、試料ガスを加熱することで振動励起した分子を測定対象にできる。

研究所付属機械工場の技術職員と連携し、月単位の積算時間を要する EMS 実験に耐える安定動作型加熱ノズルを試作した。予備実験の結果に基づき装置デザインを改良することで、メチル基のねじれ振動や一般的な変角振動などが励起可能な 1000 K 程度までの加熱を達成するガスノズルの開発に成功している。ノズルの模式図を図 3 に示す。現在、EMS 装置に組み込む高温分子ビーム源の製作を終え、振動励起にともなう分子内電子運動の変化を明らかにすべく研究を継続している。

(4) 解離イオン同時計測 EELS 実験

分子の振動励起に伴う Frank-Condon 領域の拡大によりポテンシャル交差領域への遷移が可能となれば、電子励起確率の急変や新たな反応経路が開くなど、電子励起をトリガーとする反応過程に大きな変化が生じる。ポテンシャル交差点近傍への遷移には複数の電子状態が関与しており、その影響は EELS で測定する電子散乱断面積の K 依存性に鋭敏に反映されるだろう。また、新たに解離経路が開けば、電子衝突で生じる解離生成物の大幅な収量変化が見込まれる。このため、EELS 装置に上記高温分子ビーム源を組み込むとともに、散乱電子に加え解離フラグメントを同時計測する実験を行えば、温度効果に対する電子励起状態間の非断熱結合の寄与やその反応過程への影響を明らかにできる。

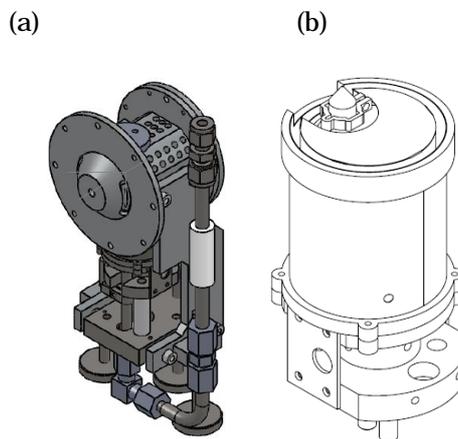


図 3 : (a)EMS 実験用高温分子ビーム源の全体図と (b)内蔵する高温ノズルの模式図

上記研究の第一段階として、まずは室温条件下において散乱電子と解離イオンとの同時計測実験を行った。解離イオン同時計測 EELS 実験で得られた結果の一例として、図 4 に N_2 の電子衝撃イオン化で生じた N^+ イオンの収量スペクトルを示す〔雑誌論文 #2〕。三つの異なる散乱角において測定を行い、イオン収量の移行運動量依存性を調べた。 $C^2\Sigma_u^+$ 状態にある N_2^+ の解離によって生じる低速 N^+ の収量と、 $F^2\Sigma_g^+$ 状態の N_2^+ に起因した、 $0.9 - 1.4$ eV の運動エネルギー (KE) をもつ N^+ に対する結果を示している。 $C^2\Sigma_u^+$ と $F^2\Sigma_g^+$ のどちらのイオン化でも、 K の増加に応じてスペクトルが大きく変化している。測定結果の解析により、低運動量移行領域でみられた形状共鳴によるイオン化断面積の増大が K の増加にともない急激に抑制されることを見出すなど、分子の電子衝撃イオン化と後続解離過程のダイナミクスに関する新たな知見が得られた。また、本実験より求まる解離イオンの放出角度分布が、電子励起に關する分子軌道の形状を強く反映することを明らかにしている〔雑誌論文 #3〕。

これらの結果から、解離イオン同時計測 EELS 法が電子励起過程とその後続緩和過程を調べるうえで、強力な実験手法となることが示された。本装置に高温分子ビーム源を組み込み、振動励起分子を対象とした測定を行うことを計画している。

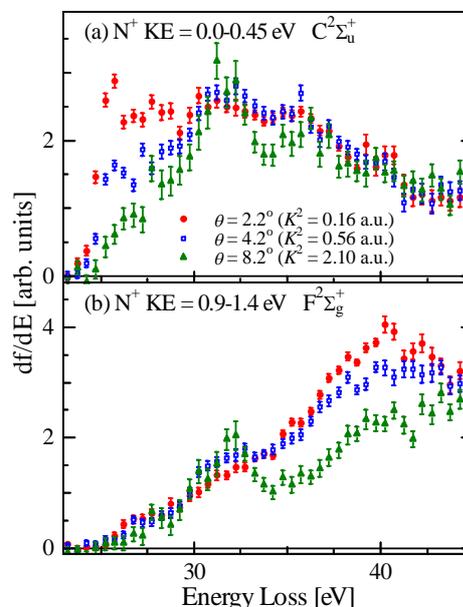


図 4: N_2 の電子衝撃イオン化で生じた N^+ の収量スペクトル

(5) まとめ

高速電子の非弾性散乱分光実験を駆使することで、分子振動にともなう電子波動関数の歪みを可視化するとともに、波動関数の形状変化が電子励起過程へ及ぼす影響を調べた。多様な分子を対象とした一連の研究から、少数の特定振動モードが分子軌道形状や電子状態間の結合にしばしば支配的に関与し、それが電子励起過程に影響を及ぼすことがわかった。電子波動関数形状に焦点を定めた振電相互作用研究として、一定の成果が得られたといえる。さらなる発展として、振動励起分子を対象とした研究を推進している。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

N. Watanabe, T. Hirayama, S. Yamada, M. Takahashi, Development of an electron-ion coincidence apparatus for molecular-frame electron energy loss spectroscopy studies, *Review of Scientific Instruments*, 査読有, 89 巻, 2018 年, 043105-1-10

DOI:10.1063/1.5025773

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Stereodynamics of electron-induced dissociative ionization of N_2 studied by (e, e^+ -ion) spectroscopy, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 査読有, 20 巻, 2018 年, 1063-1071

DOI: 10.1039/c7cp06753d

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Molecular-frame electron-scattering experiment on the dipole-forbidden $2\sigma_g \rightarrow 1\pi_g$ transition of N_2 , *Physical Review A*, 査読有, 95 巻, 2017 年, 060702(R)-1-5

DOI: 10.1103/physreva.95.060702

F. Morini, N. Watanabe, M. Kojima, M. S. Deleuze, M. Takahashi, Influence of molecular vibrations on the valence electron momentum distributions of adamantane, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 146 巻, 2017 年, 094307-1-10

DOI: 10.1063/1.4977060

Y. Tang, X. Shan, S. Niu, Z. Liu, E. Wang, N. Watanabe, M. Yamazaki, M. Takahashi, X. Chen, Electron momentum spectroscopy investigation of molecular conformations of ethanol considering vibrational effects, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, 121 巻, 2017 年, 277-287

DOI: 10.1021/acs.jpca.6b10009

N. Watanabe, K. Katafuchi, M. Yamazaki, M. Takahashi, Interference effects on ($e, 2e$) electron momentum profiles: a comparative study for CCl_4 and CF_4 , *The European Physical Journal D*, 査読有, 70 巻, 2016 年, 268-1-7

DOI: 10.1140/epjd/e2016-70516-7

Y. Tang, X. Shan, J. Yang, S. Niu, Z. Zhang, N. Watanabe, M. Yamazaki, M. Takahashi, X. Chen, Vibrational Effects on Electron Momentum Distributions of Outer-Valence Orbitals of Oxetane, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, 120 巻, 2016 年, 6855-6863

DOI: 10.1021/acs.jpca.6b06706

N. Watanabe, M. Yamazaki, M. Takahashi, Relationship between interference pattern and molecular orbital shape in (e, 2e) electron momentum profiles of SF₆, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 査読有, 209 巻, 2016 年, 78-86

DOI: 10.1016/j.elspec.2016.04.004

F. Morini, N. Watanabe, M. Kojima, M. S. Deleuze, M. Takahashi, Electron momentum spectroscopy of dimethyl ether taking account of nuclear dynamics in the electronic ground state, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 143 巻, 2015 年, 134309-1-11

DOI: 10.1063/1.4931918

〔学会発表〕(計 22 件)

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Inner-valence ionization of N₂ studied by molecular-frame EELS experiments, *International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization, and Related Topics 2017*, 2017 年

N. Watanabe, M. Yamazaki, M. Takahashi, Relationship between interference pattern and molecular orbital shape: a binary (e, 2e) study on SF₆, *XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions*, 2017 年

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Molecular-frame EELS experiment on inner-valence ionization of N₂, *XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions*, 2017 年

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Molecular-frame EELS experiment on electron-impact ionization of N₂, *33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics*, 2017 年

N. Watanabe, M. Takahashi, Angle-resolved EELS studies on vibronic coupling effects and electron-impact induced ionization dynamics, *3rd Computational Chemistry Symposium (The main symposium of 13th international conference of computational methods in science and engineering)*, 2017 年 招待講演

渡邊昇、山田聡、高橋正彦、解離イオン同時計測 EELS を用いた二原子分子の inner valence イオン化の研究、第 10 回分子科学討論会、2016 年

M. Kojima, N. Watanabe, F. Morini, M. S. Deleuze, M. Takahashi, Vibrational effects on electron momentum distributions of dimethyl ether, *12th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP12)*, 2016 年

N. Watanabe, S. Yamada, M. Takahashi, Electron-impact induced inner-valence ionization of N₂ and O₂ studied by electron-ion coincidence spectroscopy, *32nd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics*, 2016 年

N. Watanabe, M. Takahashi, Herzberg-Teller vibronic effects on electron-impact excitations of N₂O, *XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions*, 2015 年

N. Watanabe, M. Yamazaki, and M. Takahashi, EMS study of vibrational effects on electron momentum distributions of C₂H₄ and CH₂F₂, *XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions*, 2015 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://orcid.org/0000-0001-6460-512X>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：フィリッポ モリーニ

ローマ字氏名：Filippo Morini

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。