

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19095

研究課題名(和文) レーザー誘起配向分子の運動量空間分子軌道イメージングの試み

研究課題名(英文) An attempt at momentum-space molecular orbital imaging with laser-induced molecular alignment and orientation

研究代表者

山崎 優一 (YAMAZAKI, Masakazu)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：00533465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、分子の諸性質を支配する電子の「運動」の様子を分子座標系において直接可視化する新規分光法の実現を目指し、時間分解電子散乱分光技術と高強度レーザー技術との高度な融合に挑んだ。その結果、時間分解電子運動量分光の信号強度を従前と比べて6倍以上にも向上させ、ピコ秒パルス電子線を用いた原子運動量分光を実現し、また電子運動量分光データの入射電子エネルギー依存性などを明らかにすることで、「レーザー誘起配向分子の電子運動量分光」の実現へ向けた基礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、分子の性質の多くを支配する分子内電子に最大限に焦点をあてて、分子に対して電子がどの方向にどれだけの運動量をもって運動しているかを直接可視化する新手法の実現を目指すところにある。これにより、分子内電子の運動量という従来にはほとんど無かった新しい観点から化学反応機構を理解する基礎的研究にはじまり、新規機能性・高分子材料の創出を目指す応用研究まで多岐にわたる物理化学分野に資する、電子運動の立体的効果の基礎的概念の創成が期待される。

研究成果の概要(英文)： In this study, aiming at visualizing the molecular-frame electron "motion" that governs various properties of a molecule, we have challenged to combine our time-resolved electron scattering spectroscopic technique and intense laser technology. As a result, we have successfully (1) enhanced the signal count rate of the time-resolved electron momentum spectroscopy by more than six times compared to our previous study, (2) realized an atomic momentum spectroscopy, which enables us to investigate intramolecular atomic motions in a molecule, by using a picosecond pulsed electron beam, and (3) investigated that a wider range of spatial distributions of molecular orbitals could be addressed with electron momentum spectroscopy using high incident electron energies. These achievements form the basis for the realization of "electron momentum spectroscopy with laser-induced molecular alignment".

研究分野：物理化学

キーワード：分子軌道 分子配向 波動関数 時間分解分光 電子分光 コンプトン散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

化学における分子軌道概念の重要性は論を俟たない。しかしながら、分子軌道の立体特性に関する我々の理解のほとんどが、位置空間での電子分布を基にしている。一方で、分子中の電子がどのような方向にどのような速度で運動しているかを観点とした、電子の運動量空間における反応性・物性の理解は極めて乏しい。実際の化学反応や相互作用においては、電子の空間分布のみならず、速度分布も大きく関与しているはずである。事実、多価イオンによる電子捕獲過程では、正イオンと物質内電子との速度整合が電子移動の確率を支配することが知られている。

そうしたなか研究代表者は、運動量空間において分子軌道一つ一つの形状を実験的に観測する電子運動量分光の高い展開性に強い関心を抱き、本分光のユニークな特色を物理化学の広範な分野で活用することを目指して、本分光の発展形の開発を進めてきている。その結果、散乱二電子の新しい時間・位置相関計測法を利用して、従前と比して数十倍以上の究極的検出効率を有する超高感度マルチチャンネル装置の開発に成功した[引用文献]。この成果を踏まえ近年では、それまで安定基底状態に研究対象が限られていた本分光を、超短パルス電子線を励起源とする形、すなわち時間分解電子運動量分光法(Time-Resolved Electron Momentum Spectroscopy; TR-EMS [引用文献])として世界に先駆けて発展させ、短寿命電子励起状態のフロンティア電子運動の可視化に初めて成功した[引用文献]。一方で、レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向技術の発展により、今日では分子の三次元的な配向制御をレーザー電場の存在しない条件下で実現することが可能となり、配向した分子試料を分子軌道の立体特性の研究へと応用できることが大いに期待される。以上の研究代表者らの経験と実績、およびレーザーによる配向制御技術の現状を踏まえ、レーザー電場を利用した形で配向分子の電子運動量分光の一般化に挑戦する本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、これまで近似的理論計算を通じてのみしかうかがい知ることのできなかった、分子固定座標での分子軌道の電子運動量分布を、三次元的に可視化する新規実験手法の実現に挑戦する。この目的のため、研究代表者らが開発した時間分解電子運動量分光技術を、レーザーで配向制御された分子を対象とする「レーザー誘起配向分子の電子運動量分光」へと展開し、分子軌道の三次元的立体形状を運動量空間において観察する手法として開発・確立することを試みる。これにより、分子の立体効果・配向効果を分子内電子の運動という新しい視点から理解することに挑み、さらには、反応素過程の化学動力学から有機・高分子材料化学分野まで多岐にわたる物理化学に資する、「立体電子運動効果」の基礎的概念の構築を試みる。

3. 研究の方法

本研究で実現を目指すレーザー誘起配向分子の電子運動量分光は、研究代表者らが東北大学多元物質科学研究所に現有する時間分解電子運動量分光装置を転用して行う。すなわち、超音速分子線に 120 フェムト秒幅のレーザーパルスを照射して標的分子を非断熱的に配向させ、標的分子の回転周期(数ピコ秒～数十ピコ秒)に同期させて 1 ピコ秒幅の電子線パルスを入射し、レーザー電場のない条件下において、配向分子の運動量空間における分子軌道形状を観測する。電子運動量分光は、電子線コンプトン散乱の運動学的完全実験であり、大きな移行運動量および大きなエネルギー損失を伴う標的分子の高速電子衝撃イオン化で生成した非弾性散乱電子と電離電子双方のエネルギーと運動量を同時計測する。これにより、散乱前後のエネルギー保存則と運動量保存則を利用して、分子軌道ごとの電子運動量分布(運動量空間における電子波動関数の二乗振幅)を得ることができる。通常は、標的気体分子のランダムな空間的配向により、得られる運動量分布は空間平均したものになってしまうのに対し、本研究では、高強度レーザーにより気体分子の配向を規定した実験を試み、分子座標系における電子運動量密度分布の観測を目指す。現状の時間分解電子運動量分光装置を発展させた形で、本分光を実現するために、次の 5 つの研究課題を設定した。

- (1) 時間分解電子運動量分光の現状の時間分解能を桁近いに改善するため、その信号強度の向上を図った。
- (2) レーザー配向分子の電子散乱分光の予備的実験として、高速電子による準弾性散乱を利用した原子運動量分光法の時間分解計測化を図った。
- (3) 時間分解電子運動量分光の時間分解能向上の予備的実験として、電子衝撃イオン化断面積の入射電子エネルギー依存性を系統的に調べた。
- (4) 電子励起状態の電子運動量分光をさらに推進するため、準安定励起原子を標的とした電子運動量分光の開発を開始した。
- (5) 極短パルスレーザーによる分子回転運動の制御、および分子軌道を光電子波動関数に転写しその三次元立体形状を運動量空間において観測するため、時間分解レーザー光電子運動量画像分光法の開発に着手した。

4. 研究成果

- (1) 本研究が目指すレーザー誘起配向分子の電子運動量分光の実現には、時間分解電子運動量分光の信号強度の大幅な改善が不可欠である。そこで、アセトン分子の 195 nm 光誘起三体解離反

応を対象に信号強度の改善に取り組んだ。図 1 は、光化学反応開始用のフェムト秒ポンプレーザーおよびプローブ用のピコ秒パルス電子線の強度を各々従来の 5 倍および 1.6 倍にまで改善して実験を行い、アセトンの時間分解電子運動量分光の信号計数率が従来の 6.5 倍にまで増加する様子を示している（なお、図中の「本研究」は通常のアセトンに対する結果、「従来法」は重水素置換体に対する結果）。このことは、ポンプレーザーおよびプローブ電子線両者の強度を改善さえすれば、それに比例して期待通りに信号強度が増加することを実証している。この成果を受けて、重水素置換体よりも励起状態の寿命が短い、通常のアセトン分子に対しても、時間分解電子運動量分光の束縛エネルギースペクトルを得ることが可能となった。その結果、従来の解離機構に基づいて求めた理論的スペクトルと実験結果を比較することで、重水素置換体とは異なり、通常のアセトンの実験結果は従来の解離機構を支持することが分かった。

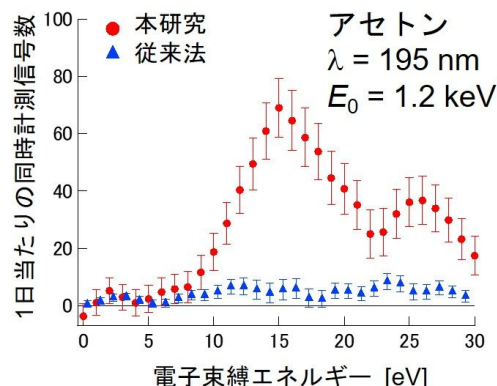


図 1. アセトンの 195 nm 励起による TR-EMS 電子束縛エネルギースペクトルの信号強度改善の実験結果

(2) (1)の研究成果により、ポンプレーザーおよびプローブ電子線両者の強度を改善さえすれば、それに比例して時間分解電子運動量分光の信号強度が増加することが実証できたものの、ポンプレーザーの光学素子へのダメージやプローブ電子線強度の安定性など多くの克服すべき課題も明らかになった。そこで本研究では、レーザー配向分子の電子散乱分光の予備実験として、「原子」運動量分光の時間分解計測化を試みた。原子運動量分光は、高速電子の準弾性後方散乱を利用して分子内原子の運動量分布を調べる手法であり、電子線コンプトン散乱の運動学的完全実験である電子運動量分光に比べて信号強度が強いため、レーザーで配向制御した分子の電子散乱信号を検出する目的に利用できると考えられる。そのためにはまず、原子運動量分光で得られるスペクトル形状について、従来の平均熱エネルギーによる解釈よりも進んだ理解が必要となる。そこで本研究では、実測スペクトルから分子の並進運動の寄与を取り除き、分子内運動の寄与のみを抽出する手法を開発した。

具体的にはまず、希ガス原子を対象とした原子運動量分光実験を系統的に行い、原子の並進運動が実験データにどのように表れるかを明らかにした。その結果、He 原子についてはバンドのピーク位置の方位角依存性が明瞭に観測されたものの、それ以外の希ガス原子については、並進運動のバンド位置に対する影響は、現状のエネルギー分解能 (0.6 eV) と比べて無視できるほど小さい事が分かった。さらに、バンド形状は希ガスの種類によらず、希ガスの速度分布の広がりによる影響も無視できることが分かった。したがって、例えばキセノン原子のスペクトル形状を装置関数として利用できることが分かった。

この成果を受けて、二原子分子の実測データから分子内部運動の寄与のみを抽出する手法の開発を試みた。二原子分子に対する実験を系統的に行った結果、希ガスの場合と異なり、並進運動の寄与を取り除いたバンドの形状(幅)が分子種に強く依存することが分かった。実験結果と比較しうる理論的スペクトルを得るため、量子論的調和振動子に対する原子運動量分布を求め、それを移行運動量ベクトル方向に射影したもの(コンプトンプロファイル)を空間平均し、装置関数で畳み込んだ。そうして得た理論的スペクトルは、二原子分子のスペクトル形状を统一的に再現し、原子運動量分光の結果と量子力学の予言が一致することを強く示唆した。そこで逆問題として、原子運動量分布の形状を実験結果に対して最適化した結果が図 2 である。実験結果に最適化した分布は、分子振動を起源とする原子運動量分布を空間平均した理論計算結果と非常に良く一致している。このことは、運動量空間において分子振動による分子内原子運動を実験的に抽出できることを示しており、原子運動量分光の時間分解計測化により、化学反応中の分子内原子運動の可視化が実現可能であることを強く示唆する。

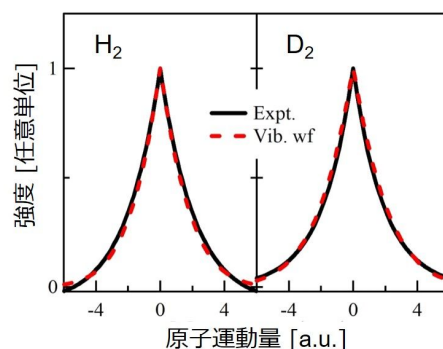


図 2. H₂ および D₂ の原子運動量分光データから分子振動による原子運動量コンプトンプロファイルを抽出した結果(実線)と理論計算結果(破線)の比較。

こうした成果を受けて、時間分解型の原子運動量分光を開発するために、チタンサファイアフェムト秒レーザーの三倍波 (267 nm) を励起源とするフォトカソード型パルス電子線源を試作し、現有の高感度マルチチャンネル型原子運動量分光装置へ実装し、予備実験を開始した。しかし、フェムト秒レーザーを二次元検出器側から電子エネルギー分析器の内部を通してフォトカ

ソードに照射すると、レーザーに由来した予期せぬ大量のノイズが発生したため、電子エネルギー分析器の電圧条件を再び最適化せざるを得なくなった。そこで電子検出のタイミングやアナライザーのスリット幅の調整、および減速レンズ電圧の最適化など試行錯誤を行い、最適化実験開始当初は約 11 eV という劣悪なエネルギー分解能を、1.4 eV にまで大幅に改善することができた。そして、従来の熱電子銃による電子線強度を約 5 桁も下回ってもなお、パルス電子線による原子運動量分光の信号を得ることに成功した。

以上(2)の研究課題に対する成果により、原子運動量分光を用いれば分子内原子の分子振動に起因した運動量分布を実験的に抽出できること、従来の熱電子銃とくらべて約 5 桁も弱い電子線強度を用いてもなお、短パルス電子線による原子運動量分光が実現可能であることを実証し、時間分解電子散乱分光に対する大きな成果を得た。このことは、当初計画していたクーロン爆発による配向度の評価法に替えて、原子運動量分光による分子内原子運動量分布を利用できることを強く示唆しており、本研究課題を大きく展開させることが可能となった。

(3) 時間分解電子運動量分光法の時間分解能を改善するためには、ポンプ用レーザーパルスとプローブ用電子パルスの速度不整合による時間分解能の劣化をできる限り抑えることが不可欠となる。そのための一つの対策として、プローブ用電子パルスの速度、すなわち入射電子エネルギーを上げることが有効となる。そこで本研究では、現状の入射電子エネルギー 1.2 keV から 4.0 keV の間の様々な入射電子エネルギーを用いて、希ガスを対象とした電子運動量分光実験を系統的に行った。結果の一例として図 3 に、Ne 2p 原子軌道に対する、三重微分断面積の運動量依存性を示す。理論計算結果は、三重微分断面積の運動量依存性を軌道の電子運動量分布と直接的に結びつけられる平面波撃力近似 (PWIA) と、イオンとのクーロン相互作用による散乱電子の波動関数の歪みを考慮した歪曲波 Born 近似 (DWBA) による 2 種の結果を示した。これらの比較から、入射電子エネルギーの増大に応じて、PWIA モデルが実験結果を再現する運動量範囲が拡大する様子が見取れる。したがって、入射電子エネルギーの増大によって、時間分解電子運動量分光の時間分解能の向上が見込まれるのみならず、観測対象とする分子軌道形状の空間範囲も拡大することを実験で確かめることができた。

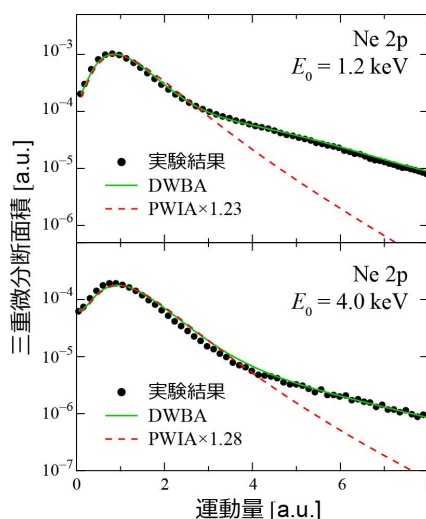


図 3. Ne 2p 原子軌道の電子衝撃イオン化に対する三重微分散乱断面積の実験結果と理論計算結果の比較。

(4) これまでの研究課題と並行して、電子励起状態の電子運動量分光をさらに発展させるべく、準安定励起原子の電子運動量分光の開発を開始した。そのために、従来使用していた漏れ出し分子線に代替する、本分光に特化した形の放電型励起原子線源の設計・試作を行い、現有の時間分解電子運動量分光に実装し、予備実験を行った。これにより今後、電子励起に伴う電子の空間分布と運動量分布の関係性を実験的に解明することが可能になると期待される。

(5) 研究最終年度には、極短パルスレーザーを用いた分子回転運動制御の第一人者である大島康裕教授 (東京工業大学) の研究室へ研究代表者が異動した。それにより、配向分子の実験をさらに推進するための絶好の環境と機会を得たため、分子配向をレーザーで制御した上で、分子軌道を光電子波動関数に転写しその三次元立体形状を運動量空間において観測するプロジェクトも並行して開始した。そのために、光電子・光イオン多重同時計測画像観測分光装置を東京工業大学へ移設し、各種設備要素やフェムト秒レーザー導入のための光学系などを整備し、検出系の調整・最適化、そしてデータ解析ソフトの開発等を現在進めているところである。

今後は、以上の成果を踏まえて最終的にレーザー誘起配向分子の電子運動量分光に挑戦する。標的としてまずは回転周期の比較的長い、ヨウ素分子を対象として取り上げ、分子の配向度測定および配向分子の電子運動量密度分布に対する実験結果と、それに対応する理論計算結果との比較を行い、本研究の基礎を築く。信号強度が予想以上に弱い場合は、レーザーの周期 5 kHz を 1 kHz に改造して 5 倍の出力を得て、相互作用領域の拡大を図るなどして、理論計算との比較が行える統計の良いデータの取得を試みる。

< 引用文献 >

- M. Yamazaki, H. Satoh, M. Ueda, D. B. Jones, Y. Asano, N. Watanabe, A. Czasch, O. Jagutzki, M. Takahashi, Meas. Sci. Technol. **22** (2011) 075602.
- M. Yamazaki, Y. Kasai, K. Oishi, H. Nakazawa, M. Takahashi, Rev. Sci. Instrum. **84** (2013) 063105.
- M. Yamazaki, K. Oishi, H. Nakazawa, C. Zhu, M. Takahashi, Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 103005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Isao Nakajima, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A comparative study of interference effects in (e, 2e) electron momentum profiles of CO ₂ , ethylene and 1,3-butadiene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamazaki Masakazu, Tachibana Yuichi, Takahashi Masahiko	4. 巻 52
2. 論文標題 Influence of translational motion of rare gas atoms on electron-atom Compton scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 065205 ~ 065205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aafdc1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamazaki M, Nakayama S, Zhu C Y, Takahashi M	4. 巻 875
2. 論文標題 Theoretical analysis of the time-resolved binary (e, 2e) binding energy spectra on three-body photodissociation of acetone at 195 nm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012004 ~ 012004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/875/2/012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakayama Shotaro, Yamazaki Masakazu, Takahashi Masahiko	4. 巻 875
2. 論文標題 Experimental and theoretical progress in time-resolved (e, 2e) electron momentum spectroscopy of photodissociation dynamics of acetone at 195 nm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 062051 ~ 062051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/875/7/062051	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山崎優一	4. 巻 11
2. 論文標題 多次元電子分光による分子軌道イメージング	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Molecular Science	6. 最初と最後の頁 A0093 ~ A0093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3175/molsci.11.A0093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamazaki Masakazu, Hosono Masaki, Tang Yaguo, Takahashi Masahiko	4. 巻 88
2. 論文標題 Development of multi-channel apparatus for electron-atom Compton scattering to study the momentum distribution of atoms in a molecule	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063103 ~ 063103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4986459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tang Yaguo, Shan Xu, Niu Shanshan, Liu Zhaohui, Wang Enliang, Watanabe Noboru, Yamazaki Masakazu, Takahashi Masahiko, Chen Xiangjun	4. 巻 121
2. 論文標題 Electron Momentum Spectroscopy Investigation of Molecular Conformations of Ethanol Considering Vibrational Effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 277 ~ 287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.6b10009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計36件(うち招待講演 8件/うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Imaging of atomic motions in a molecule using high-energy electron quasi-elastic backscattering
3. 学会等名 13th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立花佑一、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 電子散乱を利用した物質内原子運動観測法の開発
3. 学会等名 第18回東北大学多元物質科学研究所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立花佑一、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 原子・二原子分子の原子運動量分光：反応中の物質内原子運動の実時間計測へ向けて
3. 学会等名 2018年度人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミックアライアンス 生命機能 物質・デバイスシステムG3分科会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎優一、立花佑一、高橋正彦
2. 発表標題 希ガス原子と二原子分子の原子運動量分光：反応中の物質内原子運動の可視化へ向けて
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立花佑一、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 原子運動量分光を用いた二原子分子の振動波動関数形状の観測
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田健介、中山祥太郎、Le YU、山崎優一、朱超原、高橋正彦
2. 発表標題 時間分解電子運動量分光によるアセトンS2状態の光解離反応経路の研究
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Yuichi Tachibana, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Quasielastic electron backscattering experiments on rare gas atoms and diatomic molecules
3. 学会等名 The international Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Towards momentum-space imaging of nuclear dynamics by time-resolved electron scattering spectroscopy
3. 学会等名 Mini-Symposium on "Electronic and Structural Dynamics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tachibana, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Development of electron impact spectroscopy for directly observing the nuclear motions in molecular systems
3. 学会等名 The 7th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Yuichi Tachibana, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Atomic momentum spectroscopy of rare gas atoms and diatomic molecules: Towards momentum-space imaging of nuclear motions during a chemical reaction
3. 学会等名 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tachibana, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Direct observation of intramolecular motion of several diatomic molecules by using atomic momentum spectroscopy
3. 学会等名 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kensuke Iida, Shotaro Nakayama, Le Yu, Masakazu Yamazaki, Chaoyuan Zhu, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Photodissociation pathways of the acetone molecule at 195 nm studied by time-resolved electron momentum spectroscopy
3. 学会等名 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tachibana, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Momentum space imaging of molecular vibration by means of atomic momentum spectroscopy
3. 学会等名 The first International Joint Symposium of CEFMS-NCTU, RCAS-AS (Taiwan) and 5-Star Alliance (Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 レーザー駆動型パルス電子線を用いた時間分解分子軌道イメージングへの挑戦
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第38回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 時間分解電子非弾性散乱分光法の開発による物質内電子・原子移動の可視化
3. 学会等名 イノベーション・エクステンジ2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 立花佑一、細野雅貴、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 物質内原子運動の実時間測定へ向けた希ガスおよび二原子分子の原子運動量分光
3. 学会等名 第17回東北大学多元物質科学研究所研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中山祥太郎、山崎優一、Chaoyuan Zhu、高橋正彦
2. 発表標題 時間分解(e, 2e)電子運動量分光によるアセトンS2状態の光解離反応ダイナミクスの研究
3. 学会等名 第17回東北大学多元物質科学研究所研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isao Nakajima, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 On the range of validity of the plane wave impulse approximation picture for electron momentum spectroscopy
3. 学会等名 Fifth International Meeting on Frontiers of Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Towards momentum-space imaging of electronic and nuclear dynamics
3. 学会等名 Physical Chemistry Colloquium 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎優一
2. 発表標題 多次元電子分光による分子軌道イメージング
3. 学会等名 第11回分子科学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 立花佑一、細野雅貴、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 原子運動量分光による希ガス原子線の速度分布の異方性の研究
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤公洋、渡邊昇、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 蟻酸メチルの電子運動量分布に対する分子振動の影響
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島功雄、山崎優一、渡邊昇、高橋正彦
2. 発表標題 希ガス原子の電子運動量分光：平面波撃力近似の適用範囲の探索(II)
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中山祥太郎、山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 アセトンS2状態の光誘起三体解離ダイナミクスの時間分解電子運動量分光
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noboru Watanabe, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Relationship between interference pattern and molecular orbital shape: an electron momentum spectroscopy study on SF6
3. 学会等名 International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization, and Related Topics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shotaro Nakayama, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Experimental and theoretical progress in time-resolved electron momentum spectroscopy of three-body photodissociation dynamics of acetone at 195 nm
3. 学会等名 International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization, and Related Topics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Yuichi Tachibana, Masaki Hosono, Yaguo Tang, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Development of an electron-atom Compton scattering apparatus: Towards time-resolved imaging of atomic motions in momentum space
3. 学会等名 International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization, and Related Topics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isao Nakajima, Masakazu Yamazaki, Noboru Watanabe, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 A binary (e, 2e) spectroscopy study for elucidating the range of the validity of the plane wave impulse approximation
3. 学会等名 International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization, and Related Topics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Molecular orbital and atomic motion imaging using time-resolved electron scattering
3. 学会等名 XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noboru Watanabe, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Relationship between interference pattern and molecular orbital shape: a binary (e, 2e) study on SF6
3. 学会等名 XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shotaro Nakayama, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Experimental and theoretical progress in time-resolved (e, 2e) electron momentum spectroscopy of photodissociation dynamics of acetone at 195 nm
3. 学会等名 XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isao Nakajima, Masakazu Yamazaki, Noboru Watanabe, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 An electron momentum spectroscopy study for elucidating the range of the validity of the plane wave impulse approximation
3. 学会等名 XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎優一、高橋正彦
2. 発表標題 複合的時間分解電子散乱を用いた化学反応の駆動原理の可視化への挑戦
3. 学会等名 人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス平成28年度附置研アライアンス成果報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shotaro Nakayama, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Three-body photodissociation dynamics of acetone at 195 nm studied by time-resolved (e, 2e) electron momentum spectroscopy
3. 学会等名 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichi Tachibana, Masaki Hosono, Masakazu Yamazaki, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 Anisotropy of the velocity distribution of target atoms in a beam observed by atomic momentum spectroscopy
3. 学会等名 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isao Nakajima, Masakazu Yamazaki, Noboru Watanabe, Masahiko Takahashi
2. 発表標題 An electron momentum spectroscopy study for finding the range of the validity of the plane wave impulse approximation (I)
3. 学会等名 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学多元物質科学研究所業績データベース http://db.tagen.tohoku.ac.jp/php/db/view-personal.php?pserial=2961</p> <p>東京工業大学STARサーチ https://search.star.titech.ac.jp/titech-ss/pursuer.act?event=outside&key_rid=6000017666&lang=jp</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	高橋 正彦 (TAKAHASHI Masahiko) (80241579)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	