

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2015～2018

課題番号：15KT0065

研究課題名(和文)多原子系反応の実効的反應座標の決定と反応設計に向けた体系化

研究課題名(英文) Determination of Effective Reaction Coordinates and the Schematization toward Reaction Designing

研究代表者

高口 博志 (KOHGUCHI, Hiroshi)

広島大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40311188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：振動・回転状態を選択した分子イオンの並進速度を制御して、衝突反応を観測する装置の開発に取り組み、合流イオンビーム法によるイオン・分子反応実験を行った。低い衝突エネルギー条件で顕著となる内部自由度励起による反応性の変化の観測のためには、低速イオンの発散を抑制する機構が最も重要な技術要素であると特定できた。低イオン密度の衝突反応でも生成物が検出できる高感度検出器を導入するとともに、実験技術供与を目的とした共同研究において、低速制御機構を持つ極低温イオントラップによる高分解能分光実験を行った。O₂H⁺およびCH₃⁺イオンとヘリウム原子との特異的な相互作用によるエネルギー分裂構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン・分子反応は、一般に低温条件ほど反応性が高くなるといった特徴的なエネルギー依存性を示す。分子間の衝突エネルギーに比べて、反応分子内の特定された振動・回転状態の励起エネルギーが高い反応条件では、高効率でかつモード選択的な反応制御が期待できる。本研究では、振動・回転自由度および並進運動を制御したイオン分子ビームを利用する反応実験装置を開発した。また、イオンの低速制御機構を使って行った極低温分光実験では、星間分子としての存在が予測されてきたプロトン化酸素をはじめ分光学的に同定した。これらの成果は、並進制御を利用した分子イオンの分光学と反応論に関する特色のある研究成果として位置づけられる。

研究成果の概要(英文)：A molecular collision apparatus which controls internal degrees of freedoms of reactants as well as the translational energy has been built. Merging-beam experiments for ion-molecule reactions were carried out. Quantum effects on the reactivity, which was expected under a low collision energy condition, was not observed. We localized the technical problem; the slow ions with too high concentration generated with a focused laser beam significantly loose the intensity. An ion-imaging detector was introduced to obtain high sensitivity for a low concentration ion beam, whose translational energy resolution is kept narrow. We organized the collaboration to have technical supports for the slow ion control. In the collaboration, we measured the high-resolution spectra of O₂H⁺ and CH₃⁺ ions with an ultracold trap, which utilizes the same deceleration device as that with the developed apparatus. The spectral analysis yielded characteristic interactions in ion chemistry.

研究分野：化学反応論

キーワード：状態選別分子衝突 イオン・分子反応 散乱法 低温化学

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

1. 研究開始当初の背景

反応ダイナミクス研究が対象とする化学反応の機構とは、化学結合の組み換え過程を特徴づける遷移状態近傍での反応系の核運動様式を指し、原子配置がどのように動くのか、なぜ選択性が発現するのかを解明することは化学反応論の最重要課題である。遷移状態分光を実現したフェムト秒時間分解分光法が、短パルスレーザー光源の発展とともにその適用対象をナノ系・生体分子系に拡張させた一方、反応機構解明の手法として実時間測定法とは相補的なアプローチである散乱法は、状態選択的検出と組み合わせる新しい反応様式を次々と発見してきた。これらは単純な一対の化学結合の切断と形成で表わされる従来の反応機構の範疇を超えており、合成化学の反応設計の指針となる新しい多原子化学反応論の必要性を示していた。

反応ポテンシャルエネルギー曲面の鞍点に相当する遷移状態は、その形状が化学反応性を決定するとして重要視されてきた。しかし、実際の反応速度の温度依存性や、生成物分岐比・反応機構の衝突エネルギー依存性は、遷移状態の曲面形状だけでなく曲面上での核運動が反応過程を特徴づけていることを示している。遷移状態近傍での内部自由度の動的解析から反応機構を理解して制御する提案自体は新奇ではなく、単分子光分解反応に対してはデザインされた光源を用いた反応機構の能動的制御の試みが多く行われていたが、新しい化学結合の形成過程を含む二分子反応 ($A + B \rightarrow C + D$) の内部自由度制御は達成されていない挑戦的課題であった。衝突エネルギーを制御したイオン・分子反応の散乱実験において、反応機構が衝突エネルギーに敏感に依存する様子が当時の反応ダイナミクス研究における最先端の実験結果として報告されていたが、反応分子の振動・回転自由度を励起して遷移状態近傍の運動様式を制御する反応実験は、さらに難易度の高い革新的実験手法と位置づけられていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、反応分子の振動・回転自由度とともに、並進エネルギーを制御した二分子反応実験手法の開発を目的として始められた。イオン・分子反応はその反応性の高さから、実用的にも基礎科学的にも重要な反応系を多く含むが、特に低い衝突エネルギーほど反応性が高くなるといったエネルギー依存性が特徴的である。特定の振動モードを局所的に励起した分子イオンの並進エネルギーを、その振動エネルギーより低い領域まで下げた条件での反応性には、内部自由度の寄与が顕著に現れると予測される。この内部自由度・並進自由度の同時制御によって、多次元反応ポテンシャルエネルギー曲面上の領域を自在に掃引して、特に遷移状態近傍を探索することで、イオン・分子反応を制御する可能性の実証を目指した。

(2) 計画当初から、最も重要な開発要素はレーザー光イオン化で生成した状態選別分子イオンの低速輸送制御であった。研究期間内の装置開発を進める工程において、イオン輸送性能評価の結果に基づいて、極低温イオントラップ装置に使われているイオン制御技術を新たに取り入れる判断をした。極低温に冷却したヘリウムを充填したイオントラップセルは、分子イオンの分光学的研究において近年確立されてきた実験技術であるが、これに関する高い技術と経験を持つケルン大学グループと協力関係を構築した。ケルン大学との共同研究においては、イオンの並進冷却法の技術供与を得るとともに、極低温イオントラップ法の利点を最大限活用した分子イオンの高分解能分光スペクトル測定を目的とした。

3. 研究の方法

(1) リドベルグ状態を経由する共鳴多光子イオン化 (REMPI) 法を用いて、振動状態を選択した分子イオンビームを生成した。イオン光学系により分子イオンの並進速度を制御して、その並進速度分布の測定には飛行時間型の検出システムを利用した。この低速制御機構の開発および性能評価実験では、共鳴多光子イオン化法によって生成した NO^+ イオンビームを用いた。

(2) 測定対象とするイオン・分子反応系を炭化水素系イオンに拡張するために、光解離法と状態選別光イオン化を併用した状態選別イオン源を製作して、その状態選択性をスペクトル測定により評価した。リドベルグ状態を経由する REMPI 効率の高いメチルラジカルカチオン (CH_3^+) を中心として、振動状態の選択性を強く持つ前駆体種を探索した。

(3) 状態選別した NO^+ と CH_4 の合流イオンビーム法による反応実験 ($\text{NO}^+ + \text{CH}_4 \rightarrow \text{HNO} + \text{CH}_3^+ / \text{NO} + \text{CH}_4^+$) を行った。既存の RF イオンガイド法によるビーム・セル衝突型の反応実験装置では、衝突エネルギーの下限値が制限されており、室温エネルギーより低い反応条件の設定が困難である。反応イオン分子の振動励起による効果が顕著となる室温領域以下の反応性のエネルギー依存性を測定して、量子効果を観測することを目的とした。

(4) ケルン大学の極低温 22 極 RF イオントラップを用いた赤外分光測定を行った。ケルン大学の分光装置に使われているイオン分子の低速化制御機構の原理・構造を理解するとともに、実際に装置を使った測定をすることでその動作特性を調査した。測定では炭化水素系イオンとプロトン化酸素分子を対象とした。電子衝撃イオン源で生成した CH_3^+ あるいは O_2H^+ を、イオンペンダーと減速電極群を経由して数 eV 以下の低速で輸送したのち、極低温 He イオントラップに捕捉する。トラップされた分子イオンにパルス赤外レーザーおよび高分解能赤外レーザー

光源、マイクロ波光源を使って、レーザー誘起錯形成抑制 (Laser-Induced Inhibition of Complex Growth: ILLCG) スペクトルを測定した。

4. 研究成果

(1) 超音速 NO($X^2\Pi$)分子線にリドベルグ状態である $A^2\Sigma^+$ 状態を共鳴過程とする光イオン化法を適用して十分な強度のイオンビームを生成するには、レーザー光の集光を要した。これは、 $A^2\Sigma^+-X^2\Pi$ 共鳴遷移の吸収断面積 (4×10^{-16} cm²) に比べて 2 ケタ小さい $A^2\Sigma^+$ 状態からの光イオン化の吸収断面積 (1×10^{-18} cm²) が、イオン生成の律速過程となるためである。集光の結果として高密度で生成したイオン集団のクーロン反発が、特に 5 eV 以下の低い並進エネルギーで輸送している際には、並進エネルギーの分解能を著しく低下させた。NO イオンに限らず、状態選択能に利点を持つ REMPI 法は一般に集光条件下での多光子過程を利用しているため、イオン電極群の変更・改良では、状態選別低速イオンビームの生成は困難であった。これを克服するために、イオン化ステップに高強度エキシマーレーザー (308 nm) を導入して、二色二光子イオン化法を採用した。イオン化ステップ・共鳴ステップのレーザー照射条件を独立に最適化することにより、レーザー光を集光せずに状態選別 NO⁺が生成できるようになり、発生体積の増加に伴い、イオンビーム強度を 2 ケタほど向上させることができた。また、単一レーザー光源によるこれまでの REMPI スキームでの簡便な光イオン化の利点を保持する手段として、レーザー光強度を低く設定して、発生数を 10 cps 程度まで抑制したイオンビームの輸送制御性の評価を行ったところ、空間電荷効果による並進エネルギー分解能の低下がほとんど見られなかった。一方で、この条件でのイオンビーム強度は、衝突実験による生成物検出には不十分であったため、研究期間 2 年次に、単一イオンの高感度検出が可能なイメージング検出システムを導入できる仕様に分子線装置を変更した。光イオン化法の状態選択性と低衝突エネルギー衝突実験の組み合わせは当初より難易度の高い技術要素であったが、本研究課題の最大の特色であるこの課題に対して、二波長イオン化光源と高感度検出器を導入することによって、技術的な見通しを得ることができた。

(2) 状態選別したイオン分子生成を、特に炭化水素イオン系に拡張するために、レーザー光解離法によって生成したラジカル分子に、リドベルグ状態を経由する REMPI 法を適用する実験を行った。炭化水素はハロゲン基、アミノ基、ニトロ基などの置換基が結合すると 200–220 nm の深紫外光領域に強い解離性吸収をもつ分子種が多くあり、これらを対象にして、状態選択性と生成効率の高い炭化水素イオン種を探索した。系統的に進めた実験において、アミン類から光解離したメチルラジカル (CH₃) は、メチル基の数に応じて生成振動状態が異なり、これをリドベルグ状態経由の REMPI 法でイオン化することで、状態選択的な CH₃⁺ が効率よく生成できることを見出した (図 1)。一級アミンであるメチルアミン (CH₃NH₂) は 200–220 nm の S₀ S₁ 吸収帯を光励起すると、CH 伸縮振動が特異的に励起した CH₃ を生成する一方で、三級アミンであるトリメチルアミン ((CH₃)₃N) は S₀ S₂ 励起により、面外変角振動が選択的に高く励起された CH₃ を生成する様子が測定された。ここでは CH₃ の 3p リドベルグ状態を経由する REMPI 法の効率が極めて高いことを利用した。アンモニア骨格に結合するメチル基の数によって生成振動状態に顕著な違いが生じる動力学理由を、解離波長の掃引に伴う終状態分布・散乱分布の変化から考察した。アミンの電子励起状態は、窒素原子のリドベルグ電子の昇位により S₁ (3s) および S₂ (3p) 状態を形成するが、解離性価電子 (σ^{*}) 状態と強く相互作用するリドベルグ状態が、CH₃NH₂ では S₁ (3s) であるのに対して、(CH₃)₃N では S₂ (3p) で解離反応が進行することを明らかにした。量子化学計算によってもこの反応機構の解釈が検証され、有機アミンの光解離ダイナミクス特性を利用した状態選別した CH₃⁺ (ν₂, ν₃) の発生法を確立することができた。

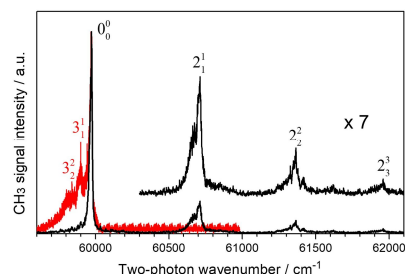


図 1 振動状態選別した CH₃⁺ビームの CH 伸縮 (ν₃)、面外変角 (ν₂) モードの選択的励起。前駆体：(黒)(CH₃)₃N、(赤)CH₃NH₂

(3) 状態選別した NO⁺をイオンバンダーにより前駆体 NO 分子線と分離して、直交する中性 CH₄ 分子線と同軸に混合する合流イオンビーム法による反応実験では、ヒドリド移動経路 () と電荷移動経路 () の分岐過程の衝突エネルギー依存性の観測を目指した。[NO⁺ + CH₄ → HNO + CH₃⁺ / NO + CH₄⁺]。NO⁺と CH₄ との衝突により NO⁺の強度が最大で 30 % 減少する様子が観測され、反応確率を測定する実験装置としての動作が確認された。反応過程 と の反応分岐比の決定のために、パルス引き出し電場を用いて測定した飛行時間スペクトルでは、CH₃⁺ () と CH₄⁺ () のピークがそれぞれ広がって重なっていた。また、NO⁺との並進エネルギーを押し出し電極電圧 1 ~ 10 eV の範囲で掃引すると、低衝突エネルギー条件で NO⁺ビーム強度が急激に低くなり、測定した反応確率の解析には有意な衝突エネルギー依存性が現れなかった。これらはいずれも光イオン化による発生点から反応領域まで低い並進速度で輸送する際に、イオンが発散して空間的・速度的にビームが広がったことに起因する。異なる形状

の電極を使った測定を行い、輸送電極の設計変更によってイオンビーム強度と速度幅を変化させられることが実測により検証でき、また、このイオンビーム輸送特性は、制御電極群が形成する静電場中のイオン経路シミュレーション計算によっても再現された。速度広がり (Δv) は 1 eV の並進エネルギー条件では 1000 % ($\Delta v/v = 10$) 近くに達しており、これが飛行時間スペクトル形状と反応確率の衝突エネルギー依存性の実験結果に反映されたと説明できる。予想した実験結果が得られなかった原因は特定されたが、レーザー分光によって高密度で発生した光イオンのクーロン反発(空間電荷効果)は、静電イオン光学電極の形状と条件では解消できないことも明らかとなった。この結果を受けて、レーザー光源と検出システムを含めて当初の装置設計を見直し、大幅な仕様変更に着手した(研究成果(1))。

(4) イオン・分子反応の反応機構の特徴は低エネルギー(低温)条件で顕著になる。衝突エネルギーが十分に低い条件下での衝突実験を実現するためには、イオン分子の低速制御機構の導入とその動作条件の最適化が重要である(研究成果(3))。極低温イオントラップ実験装置の長い開発経験を持つケルン大学グループとの共同研究体制を構築して、12ヶ月に渡る滞在期間中にイオン制御に関する技術供与を得るとともに、22極RFイオントラップ装置を使った分子イオンの分光学的研究を行った。電子衝撃法によるイオン源は本研究課題で開発したレーザー化イオン源と異なり、状態選択能を持たない。フィラメント温度で生成したイオンは、引き出し電場によって10 eV程度の並進エネルギーを持つが、極低温ヘリウムを充填したセルに輸送するまでに、イオン制御電極によって段階的に減速される。この減速機構を光イオン化ビーム反応装置に採用することを目的とした。極低温イオントラップ装置の利点を活かした分光測定対象として、プロトン化酸素分子(O_2H^+)を選んだ。 H_3^+ はほとんどすべての原子・分子種にプロトンを与える星間化学での最重要活性種であるが、 H_3^+ によるプロトン化が自発的に進まないごくわずかの例外的な分子種の一つが酸素分子であり、このため O_2H^+ は星間空間には存在しないとされてきた。星間分子としての同定には天文観測データとなる高分解能分光スペクトルが不可欠であるが、効率のよい O_2H^+ を生成法と感度の高いイオン分光検出法がなかったため、これまでいずれの波長領域においても分光学的には検出されていなかった。過酸化水素(H_2O_2)を前駆体としたイオン源を使って生成した O_2H^+ を極低温のHeイオントラップに蓄積することで、この分子イオンの赤外スペクトルの測定に成功した。ここで適用したLIICG分光法は、トラップ内でのHe錯体形成の平衡($O_2H^+ + He \rightleftharpoons O_2H^+ \cdot He$)を利用した高感度測定法である。得られたCH伸縮振動領域の高分解能赤外スペクトルには、微細・超微細構造が分離して観測され(図2)、分光学的定数を高精度で決定することができた。得られた分子定数をもとにして、電波天文観測の基礎データとなるマイクロ波スペクトルを予測してその測定を試みたが、純回転遷移ピークは検出されなかった。錯体形成平衡の変化が純回転遷移の共鳴によって最大化する条件を探索する必要性を示しており、これを今後の課題とした。同様の分光システムを CH_3^+ 系に適用して、 CH_3^+ ヘリウムクラスター($CH_3^+ \cdot He$, $CH_3^+ \cdot He_2$)の高分解能赤外スペクトルおよびマイクロ波純回転スペクトルを測定した。 $CH_3^+ \cdot He$ は平面形の CH_3^+ の上にHeが付着する対称的構造が知られていたが、対称コマ分子では原理的に現れない1 MHz程度の微小なエネルギー分裂が観測された。この異常に小さいエネルギー分裂は分子構造の非対称性に帰することができず、特異的な分子間相互作用に由来するエネルギー分裂であると結論づけた。

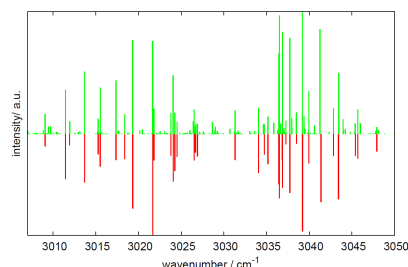


図2 プロトン化酸素分子(O_2H^+)のレーザー誘起錯体形成抑制(LIICG)スペクトル。(上、緑)実測スペクトル、(下、赤)理論スペクトル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)(以下、すべて査読あり)

1. M. Töpfer, P. C. Schmid, H. Kohguchi, K. M. T. Yamada, S. Schlemmer, and O. Asvany, "Infrared Photodissociation of Cold $CH_3^+ - He_2$ Complexes", DOI: 10.1080/00268976.2018.1563727 *Mol. Phys. (in press)* (2019).
2. Y. Onitsuka, Y. Kadowaki, A. Tamakubo, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, "Energy Dependence of Photodissociation Dynamics of Trimethylamine over the S_2 and S_1 Excited States", *Chem. Phys. Lett.* 716, 28-34, DOI: 10.1016/j.cplett.2018.11.062 (*Cover Picture*) (2019).
3. T. Salomon, M. Töpfer, P. Schreier, S. Schlemmer, H. Kohguchi, L. Surin, and O. Asvany, "Double Resonance Rotational Spectroscopy of $HCO^+ - He$ ", *Phys. Chem. Chem. Phys., Advance Article*, 21, 3440-3445. DOI: 10.1039/C8CP04532A (*PCCP HOT Articles*) (2019).
4. H. Nakata, K. Nagamori, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, "Detection of direct NO loss in the ultraviolet photodissociation of $Co(CO)_3NO$ ", *Chem. Phys. Lett.* 707, 150-153, DOI: 10.1016/j.cplett.2018.07.049 (2018).
5. M. Töpfer, T. Salomon, S. Schlemmer, O. Asvany, O. Dopfer, H. Kohguchi, and K. M. T. Yamada "Double Resonance Rotational Spectroscopy of Weakly Bound Ionic Complexes: The rotational spectrum of floppy $CH_3^+ - He$ ", *Phys. Rev. Lett.* 121, 143001, DOI:

- 10.1103/PhysRevLett.121.143001 (2018)
6. H. Kohguchi, P. Jusko, K. M. T. Yamada, S. Schlemmer, and O. Asvany, "High-resolution infrared spectroscopy of O_2H^+ in a cryogenic ion trap", *J. Chem. Phys.* 148, 144303, DOI: 10.1063/1.5023633 (2018).
 7. M. Sumida, S. Masumoto, M. Kato, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, "Internal and Translational Energy Partitioning of the NO Product in the S_2 Photodissociation of Methyl Nitrite", *Chem. Phys. Lett.* 674, 58-63, DOI: 10.1016/j.cplett.2017.02.044 (2017).
 8. Y. Onitsuka, K. Yamasaki, H. Goto, H. Kohguchi, "Detection of the Excited-State NH_2 (\tilde{A}^2A_1) in the Ultraviolet Photodissociation of Methylamine", *J. Phys. Chem. A* 120 (43), 8584–8589, DOI: 10.1021/acs.jpca.6b08674 (2016).
 9. M. Sumida, Y. Kohge, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, "Multiple Product Pathways in Photodissociation of Nitromethane at 213 nm", *J. Chem. Phys.* 144, 064304, DOI: 10.1063/1.4941090 (2016).

[学会発表](計 39 件)

1. Hiroshi KOHGUCHI, Dynamical Alignment of Photoeliminated Ligands from Transition Metal Complexes, 2019 the 3rd International Conference on Materials Engineering and Nano Sciences (ICMENS 2019), 20190326
2. K. Nagamori, H. Nakata, M. Haze, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Photochemistry of Transition-Metal Carbonyls in the Gas Phase, The 15th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 201812
3. H. Nakata, K. Nagamori, M. Haze, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Photoinduced Elimination of CO and NO Ligands from the Heteroleptic Transition-Metal Complex: $Co(CO)_3NO$, The 15th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 201812
4. 高口博志, Chemical Dynamics Studies by State-Resolved Particle Imaging: - Photochemistry of Transition-Metal Complexes and Amines -, 理研セミナー, 201811
5. Hiroshi Kohguchi, Probing the Effective Reaction Coordinates of Ligand Elimination in Photodissociation of $Co(CO)_3NO$, The 22nd East Asian Workshop on Chemical Dynamics, 201810
6. 高口博志, 山田耕一, Pavol Jusko, Stephan Schlemmer, Oskar Asvay, プロトン化酸素 O_2H^+ の極低温イオントラップ高分解能赤外分光, 第 12 回分子科学討論会, 201809
7. 鬼塚侑樹, 門脇悠稀, 山崎勝義, 高口博志, 光励起されたトリメチルアミンの多段階分岐反応の励起エネルギー依存性, 第 12 回分子科学討論会, 201809
8. 井上昂輔, 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志, N,N-ジメチルホルムアミドの N-CHO および N- CH_3 結合における光解離反応の動力学的研究, 第 12 回分子科学討論会, 201809
9. 中田裕之, 長森啓悟, 山崎勝義, 高口博志, 紫外光励起した遷移金属ニトロシル錯体の配位結合解離経路の分岐, 第 12 回分子科学討論会, 201809
10. K. Nagamori, H. Nakata, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Photoreaction Chemistry of Transition-Metal Carbonyls in the gas phase, 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201806
11. H. Nakata, K. Nagamori, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Probing the effective reaction coordinates of ligand elimination in photodissociation of the $Co(CO)_3NO$ complex, 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201806
12. Y. Onitsuka, Y. Kadowaki, Y. Yamasaki, H. Kohguchi, Photodissociation and Electronic Relaxation in the S_2 and S_1 Excited States of Trimethylamine, 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201806
13. 高口博志, 山田耕一, Pavol Jusko, Stephan Schlemmer, Oskar Asvany, 極低温イオントラップによるプロトン化酸素 O_2H^+ の高分解能赤外分光, 第 18 回分子分光研究会, 201803
14. Hiroshi KOHGUCHI, Ion-Imaging Study: State-Resolved Scattering of Photodissociation in Transition Metal Complexes, Kassel Workshop in Molecular Physics, 201801
15. H. Nakata, K. Nagamori, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Photoelimination Dynamics Study of Tricarbonylnitrosylcobalt by Analyzing the Motion of Eliminated Ligands, The 14th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 201712
16. Yuuki Onitsuka, Shogo Tendo, Hiroki Goto, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroshi Kohguchi, Detection of Electronically Excited NH_2 product in the Ultraviolet Photodissociation of Methylamine, The 14th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 201712
17. Yuuki Onitsuka, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroshi Kohguchi, Non-adiabatic Dynamics around the Conical Intersection of Ammonia-derivative Species, 第 13 回若手研究者による先端的レーザー分光シンポジウム, 201712
18. Hiroshi KOHGUCHI, State-Resolved Scattering Study of Ligand-Photoelimination of Transition Metal Complexes in the Gas Phase, IRAP Seminar, 201711
19. 門脇悠稀, 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志, トリメチルアミン励起状態ダイナミクスと光解離機構の解明, 第 11 回分子科学討論会, 201709
20. 中田裕之, 山崎勝義, 高口博志, 配位子の運動解析による遷移金属カルボニル錯体の光解離反応の研究, 第 11 回分子科学討論会, 201709
21. 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 後藤寛貴, 高口博志, メチルアミンの紫外光解離における電子励起

- 状態 NH₂ の検出, 第 11 回分子科学討論会, 201709
22. Hiroshi KOHGUCHI, Photodissociation Studies in an Ion-Imaging Experiment, Horizons in Cold Cluster Spectroscopy, 201709
 23. M. Sumida, S. Masumoto, M. Kato, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, Internal and translational energy partitioning of the NO product in the S₂ photodissociation of methyl nitrite, 34th International Symposium on Free Radicals, 201708
 24. Yuuki Onitsuka, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroki Goto, Hiroshi Kohguchi, Detection of the Excited State NH₂(A²A₁) in the Ultraviolet photodissociation of methylamine, International Symposium on Diversity of Chemical Reaction Dynamics, 201707
 25. H. Nakata, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Structural dynamics of photoexcited transition metal carbonyls - Approach from the motion of photoeliminated ligands -, International Symposium on Diversity of Chemical Reaction Dynamics, 201707
 26. Hiroshi Kohguchi, Koichi Yamada, Pavol Jusko, Stephan Schlemmer, Oskar Asvany, Vibrational Spectroscopy of He-O₂H⁺ and O₂H⁺, 73rd International Symposium on Molecular Spectroscopy, Urbana-Champaign, June 2017, 201706
 27. H. Nakata, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Probing photochemical reaction of pentacarbonyliron(0) in the MLCT state by using REMPI spectroscopy and ion imaging, 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201706
 28. Y. Onitsuka, K. Yamasaki, H. Goto, and H. Kohguchi, Detection of the Excited State NH₂(A²A₁) in the Ultraviolet Photodissociation of Methylamine, International Conference on Molecular Energy Transfer 2017 (iCOMET 2017), 201701
 29. 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志, 電子励起状態の NH₂ を生成するメチルアミンの光解離ダイナミクス, 第 10 回分子科学討論会, 201609
 30. 住田聖太, 益本修, 加藤光枝, 山崎勝義, 高口博志, Dynamics study of CH₃ONO characterized by the internal state anti-correlation of the photofragments, 第 10 回分子科学討論会, 201609
 31. Y. Onitsuka, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Identification of the Electronically Excited NH₂ Product in the Photodissociation of Methylamine, 32th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201606
 32. M. Sumida, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Dynamics study of multiple product pathways in the photodissociation of nitromethane, The 12th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 201512
 33. Y. Onitsuka, T. Yanaidani, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, Observation of the photodissociation dynamics of methylamine showing the specific final state distribution, International Symposium Recent Progress in Molecular Science of Korea and Japan, 201507
 34. 鬼塚侑樹, 柳井谷拓馬, 山崎勝義, 高口博志, 特異的終状態分布を示すメチルアミンの前期解離ダイナミクスの観測, 第 9 回分子科学討論会, 201509
 35. 住田聖太, 山崎勝義, 高口博志, 解離生成物の全自由度測定によるニトロメタンの多経路光解離反応の動力学的研究, 第 9 回分子科学討論会, 201509
 36. M. Sumida, T. Hanada, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Site-selective photochemistry observed for allyl iodide, Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, 201507
 37. M. Sumida, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Dynamics study of the photodissociation of nitromethane following the π*←π excitation, Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, 201507
 38. Y. Onitsuka, T. Yanaidani, K. Yamasaki, and H. Kohguchi, Dependence of the Product Pathways in the Photodissociation of Methylamine on the Available Energy, 31th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201506
 39. M. Sumida, K. Yamasaki, H. Kohguchi, Dynamics study of the photodissociation of nitromethane following the π*←π excitation, 31th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 201506

[図書](計 1 件)

「現代化学」(東京化学同人) 2016 年 4 月号 基礎講座「化学反応はなぜ起こるか」高口博志

[その他]

広島大学大学院理学研究科化学専攻 反応物理学研究グループ ホームページ
<https://home.hiroshima-u.ac.jp/pchem/>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

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。