

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05374

研究課題名(和文) 真空紫外発光観測による原子の紫外2光子励起検出法の確立

研究課題名(英文) Detection of atoms with ultraviolet emission induced by two-photon excitation with ultraviolet light

研究代表者

山崎 勝義 (Yamasaki, Katsuyoshi)

広島大学・先進理工系科学研究科(理)・教授

研究者番号：90210385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：酸素(O)、硫黄(S)、塩素(Cl)、臭素(Br)の各原子を紫外2光子励起し真空紫外発光により高感度検出する方法の新規開発に成功した。酸素原子と硫黄原子については、2光子励起準位のHeとN<sub>2</sub>による総括消光速度定数および状態選択的消光速度定数を決定した。塩素原子と臭素原子については、それぞれ25本の許容遷移について検出を試み、塩素原子は18本、臭素原子は20本の検出に成功した。検出できなかった遷移のうち4本は2つの原子に共通であり、すべて4重項状態であることから、スピン-軌道相互作用が大きいハロゲン原子でも完全にはスピン禁制が破れていないことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

酸素原子、塩素原子、臭素原子について、過去に例がない2光子励起真空紫外発光検出法を確立し、赤外発光を検出する従来法の検出限界濃度 $10^{10}$  cm<sup>-3</sup>よりも約2桁低い濃度( $10^8$  cm<sup>-3</sup>)の検出を目標どおり実現できたことは、燃焼化学、大気化学、プラズマ化学の研究において精緻な観測や診断が可能になる意味で工学面での学術的成果である。また、2光子励起準位の消光過程について総括速度定数だけでなく、特定の状態間の消光過程の分岐比を決定する方法論を確立し測定に成功したことは理学面での大きな学術的成果である。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in developing a new method for detecting oxygen, sulfur, chlorine, and bromine atoms by two-photon UV excitation and vacuum UV emission. For oxygen and sulfur atoms, the rate coefficients for overall and state-selective quenching of the two-photon excitation level by collisions with He and N<sub>2</sub> were determined. For chlorine and bromine atoms, we tried to detect 25 allowed transitions and succeeded in detecting 18 chlorine and 20 bromine transitions, respectively. Four of the undetectable transitions were common to the two atoms and were all in the quartet state, indicating that the spin forbiddance is not completely broken even for the halogen atoms with large spin-orbit interactions.

研究分野：反応物理化学

キーワード：レーザー分光法 レーザ誘起蛍光法 2光子励起 真空紫外発光 電子消光

1. 研究開始当初の背景

気体中の原子を非接触に検出し濃度を測定することは、大気、燃焼、プラズマ中で進行する複雑な化学反応を解明するために必須の作業であり、光吸収あるいは発光観測が利用されている。しかし、多くの原子の光吸収・発光波長は空气中を透過しない真空紫外領域(VUV;  $\lambda < 200 \text{ nm}$ )にあるため、光照射や発光観測をすべて真空中で行う必要があり、複雑かつ高額な装置が必要になる。解決策として、紫外領域(UV;  $\lambda = 200 \sim 300 \text{ nm}$ )のレーザー光を2光子吸収させ、励起状態からの赤外発光(IR;  $\lambda = 800 \sim 1000 \text{ nm}$ )を観測する方法が開発されているが、赤外発光は検出効率が低いため、たとえば、酸素原子の検出限界濃度( $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )は、真空紫外光を照射する方法より約2桁高い。したがって、発光検出感度の増大が、原子の光学的検出において改善すべき最重要ポイントである。

2. 研究の目的

本研究は、一般に、波長( $\lambda$ )が短い遷移ほど輻射寿命( $\tau$ )が短い( $\tau \propto \lambda^{-3}$ )ことを示す Einstein の A 係数の式に着想を得て、発光検出波長を赤外光から真空紫外光に変更する方法の実現を目指した。赤外光( $\lambda_{\text{IR}} \approx 1000 \text{ nm}$ )と真空紫外光( $\lambda_{\text{VUV}} \approx 150 \text{ nm}$ )の波長比は $\lambda_{\text{IR}}/\lambda_{\text{VUV}} \approx 6.7$ であるから $(\lambda_{\text{IR}}/\lambda_{\text{VUV}})^3 \approx 300$ となり、理論上、検出感度を2桁以上向上させることが可能である。具体的には、概略図(図1)に示すように、原子を紫外2光子励起したのち(波長:  $\lambda_1$ )生じうる真空紫外発光(波長:  $\lambda_3$ )を検出し、検出感度を赤外観測法よりも100倍以上向上させることが目的であり、本研究では酸素、硫黄、塩素、臭素原子を対象とした。また、発光検出の最大の弱点は、励起準位が周囲の分子との衝突により脱励起する消光過程であり、消光効率(速度)が検出限界を大きく左右する。したがって、衝突分子による消光速度の情報も重要であるから、He および  $\text{N}_2$  による消光速度定数の測定を行った。さらに、単なる総括消光過程  $k_Q$  の速度だけでなく、遷移先の電子状態を限定した状態選択的消光速度定数  $k_{Q1}$  の測定も目的とした。紫外光照射による高感度原子検出法による、大気、燃焼、プラズマでの反応解析や診断の実現と測定精度の劇的な向上による理工学分野での学術的波及効果を期待して研究を開始した。

3. 研究の方法

実験装置の概略図を図2に示す。酸素、硫黄、塩素、臭素の各原子は、フローセル中の試料へのパルスレーザー光を照射により生成した。図1の準位A, B, Cに対応する各原子の電子配置(および電子状態)と準位Aの生成方法を以下に記す。

- ・ 酸素 O(A =  $2p^4 \ ^3P$ , B =  $2p^3 3p \ ^3P$ , C =  $2p^3 3s \ ^3S$ ): オゾン( $\text{O}_3$ )の紫外光(248 nm)解離により生成する励起酸素原子  $\text{O}(^1D)$ と  $\text{O}_3$  の反応( $\text{O}(^1D) + \text{O}_3 \rightarrow 2\text{O}(^3P) + \text{O}_2$ )
- ・ 硫黄 S(A =  $3p^4 \ ^3P$ , B =  $3p^3 4p \ ^3P$ , C =  $3p^3 4s \ ^3S$ ): 硫化カルボニル( $\text{OCS}$ )の248 nm 光解離
- ・ 塩素 Cl(A =  $3p^5 \ ^2P$ , B =  $3p^4 4p$ , C =  $3p^4 4s$ ): クロロホルム( $\text{CHCl}_3$ )の193 nm 光解離
- ・ 臭素 Br(A =  $4p^5 \ ^2P$ , B =  $4p^4 5p$ , C =  $4p^4 5s$ ): ブロモホルム( $\text{CHBr}_3$ )の250~270 nm 光解離(臭素のみ one-color 実験)

各原子は YAG レーザ励起色素レーザーにより発生した紫外光をレンズ(焦点距離: 300 mm)で集光し、2光子励起後に生じる真空紫外発光を各原子の発光波長に合わせて選択したバンドパスフィルタおよび真空紫外光電子増倍管(PMT)により検出した。PMTからの信号を増幅したのち平均化し、デジタル信号に変換後、PCに取り込んだ。発光寿命を測定する際には、PMTからの信号を直接ストレージオシロスコープ(時間分解能: 100~200 ps)に取り込んだ。

4. 研究成果

(1) 2光子励起準位の総括消光速度定数の測

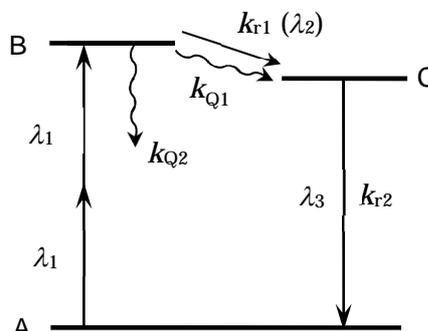


図1. 原子検出過程概略図  
(A, B, Cは電子状態,  $\lambda$ は波長,  $k$ は速度定数を表す。  $k_Q = k_{Q1} + k_{Q2}$ )

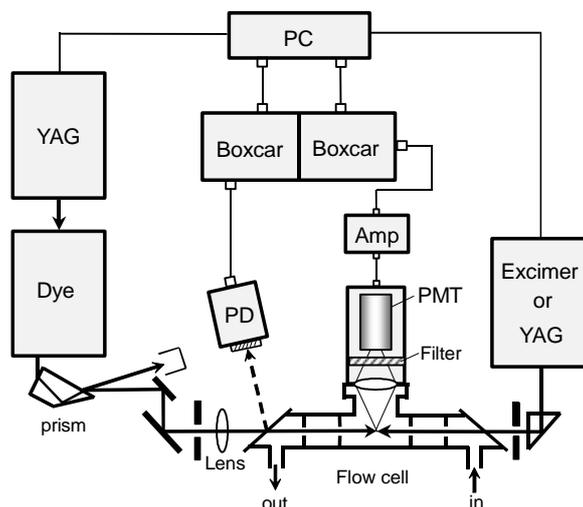
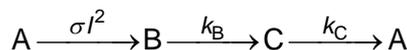


図2. 実験装置概略図

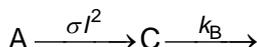
PMT: 真空紫外光電子増倍管, PD: フォトダイオード, Amp: 信号増幅器, YAG: YAG レーザ, Dye: 色素レーザー, Excimer: エキシマーレーザー, Boxcar: 信号平均化装置

定

2光子励起準位(図1のB)の消光速度定数および輻射寿命を決定するために、2光子励起後の真空紫外発光強度の減衰速度の全圧(M = He または N<sub>2</sub>)依存性を観測した(図3: 酸素原子のHe圧依存性)。図3は図1のC → Aにあたる真空紫外発光強度の経時変化を示しているが、図3の観測波形の減衰部分は2光子励起準位Bの減衰に対応している点に注意する必要がある。2光子励起から真空紫外発光までのプロセスは



により表される。 $\sigma$ は2光子吸収断面積、 $I$ は2光子励起光強度、 $k_B$ 、 $k_C$ はそれぞれ準位B、Cの総括減衰速度である( $k_B = k_{r1} + k_Q[M]$ ,  $k_C = k_{r2}$ )。先行研究により  $k_B \ll k_C$  が既知であるから、Cの見かけの増加は  $k_C$  に依存し、減衰は  $k_B$  に依存する。さらに、 $k_B \ll k_C$  の条件からCの濃度に定常状態近似が適用できるので、 $[C] \approx (k_B/k_C)[B]$  より、BとCの経時変化(時間依存性)はほぼ同じになる。したがって、プロセス全体を



と表すことができる。これより、図3の波形の減衰部の圧力依存性の解析から  $k_B$ 、つまり、2光子励起準位Bの減衰速度が決定できる。以上のように、速度論的解析を駆使し、測定対象の準位とは異なる準位の発光観測にもとづいて、対象準位の速度定数を決定する点は本研究の優れた特長の1つである。

図3からわかるように、励起レーザーの照射時間幅が発光寿命に比べて無視できない幅であるから、発光波形を励起レーザー波形を用いて、独自に開発したprofile積積分法により解析し、2光子励起準位の擬1次減衰速度  $k_B$  を決定した。 $k_B$  のHe濃度依存性のプロット(図4)の回帰線の切片からO(2p<sup>3</sup>3p<sup>3</sup>P)の輻射寿命( $k_{r1} = 34 \pm 3$  ns)、勾配からHeによる総括消光速度定数( $k_Q = (2.1 \pm 0.1) \times 10^{-12}$  cm<sup>3</sup> molecule<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)を決定した。消光速度定数の既報値には1桁程度のばらつきがあったが((1.6 ~ 15) × 10<sup>-12</sup> cm<sup>3</sup> molecule<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)、本研究の結果は小さい速度定数を支持している。同様の測定・解析をS原子についても行い、総括消光速度定数  $k_Q$  を決定した(表1)。

## (2) 状態選択的消光速度定数および分岐比の測定

前項(1)では、消光先を限定しない総括消光過程の速度定数を決定したが、解析をさらに進め、2光子励起準位から特定の準位への状態選択的消光速度定数を決定した。図3の発光波形の面積  $S$  と衝突分子(M)の濃度の間に次式の関係があることを見出し( $\alpha$ は装置定数)、

$$S(k_{r1} + k_Q[M]) = \alpha[A]_0(k_{r1} + k_{Q1}[M])$$

上式左辺の[M]に対するプロットの直線回帰線の勾配と切片の比から、2光子励起準位Bから準位Cへの状態選択的消光速度定数  $k_{Q1}$  および分岐比  $k_{Q1}/k_Q$  を決定した(表1)。S原子に関する結果をまとめた論文は高評価を受け、*Chem. Phys. Lett.*誌の表紙に掲載された。

表1からわかるように、総括速度定数は、O原子、S原子ともにHeよりもN<sub>2</sub>の方が格段に速く、O原子の場合300倍、S原子の場合26倍である。この大きな速度定数の差は、N<sub>2</sub>との衝突では比較的中寿命の間体N<sub>2</sub>Oが形成され、消光先の電子状態への遷移確率が大きくなるのが原因であると考えられる。総括消光速度定数とは対照的に、状態選択的消光の分岐比はすべての組み合わせで約20%となった。この原因は、O原子とS原子の準位エネルギーは大きく異なるもの

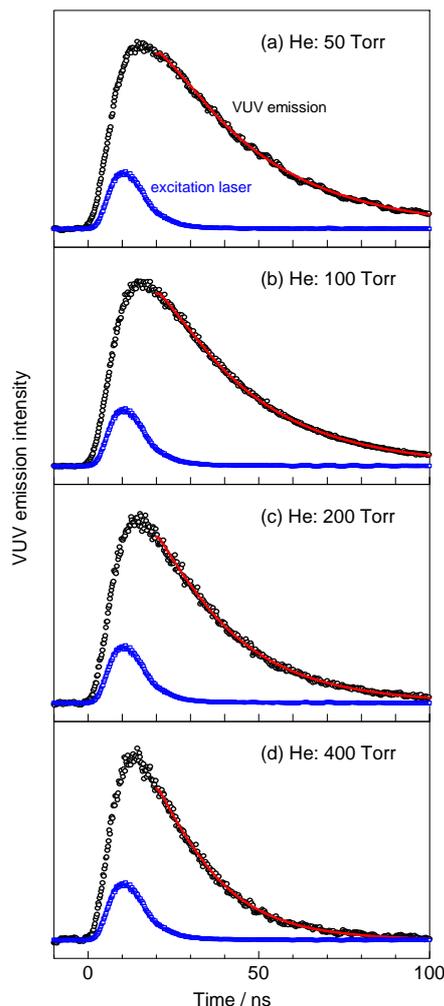


図3. 酸素原子2光子励起(2p<sup>3</sup>3p<sup>3</sup>P ← 2p<sup>4</sup>3P<sub>2</sub>)後の真空紫外発光(2p<sup>3</sup>3s<sup>3</sup>S → 2p<sup>4</sup>3P<sub>2</sub>)強度の経時変化.  $p(O_3) = 6$  mTorr. ○: 発光シグナル, ◦: 励起レーザー波形, ◐: profile積積分解析フィッティング。

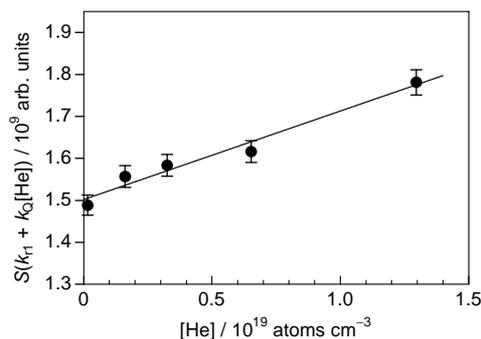


図4. 酸素原子2光子励起(2p<sup>3</sup>3p<sup>3</sup>P ← 2p<sup>4</sup>3P<sub>2</sub>)後の真空紫外発光(2p<sup>3</sup>3s<sup>3</sup>S → 2p<sup>4</sup>3P<sub>2</sub>)強度の経時変化のHe濃度依存性。

の,同族原子であるから消光先の電子状態の数が同数であり,エネルギー準位構造が類似していることが原因であると解釈できる。検出した原子の濃度を見積もったところ $\approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ となり,従来法より2桁以上の検出効率を実現するという本研究の目的が達成できていることが確認できた。

表 1. O 原子および S 原子の He と N<sub>2</sub> による総括消光速度定数と状態選択的消光速度定数

	M = He		M = N <sub>2</sub>	
	$k_Q$	$k_{Q1}$	$k_Q$	$k_{Q1}$
O(2p <sup>3</sup> 3p <sup>3</sup> P)	$(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-12}$	$(4.1 \pm 0.8) \times 10^{-13}$ ( $k_{Q1}/k_Q = 20 \pm 4\%$ )	$(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-10}$	$(1.1 \pm 0.6) \times 10^{-10}$ ( $k_{Q1}/k_Q = 17 \pm 12\%$ )
S(3p <sup>3</sup> 4p <sup>3</sup> P)	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^{-11}$	$(4.3 \pm 1.4) \times 10^{-12}$ ( $k_{Q1}/k_Q = 24 \pm 8\%$ )	$(4.7 \pm 0.4) \times 10^{-10}$	$(9.4 \pm 2.8) \times 10^{-11}$ ( $k_{Q1}/k_Q = 20 \pm 5\%$ )

(速度定数の単位は  $\text{cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 誤差幅は  $2\sigma$ )

### (3) ハロゲン原子の2光子励起真空紫外発光検出法の確立

塩素(Cl)および臭素(Br)原子について2光子励起真空紫外発光検出法を試み,図5に示すように十分な強度でシグナルを観測することに成功した。Cl原子とBr原子は同族原子であるから,主量子数が異なるだけでエネルギー構造は類似しており,Cl原子の電子配置3p<sup>4</sup>とBr原子の電子配置4p<sup>4</sup>には13の電子状態(項)がある。基底電子配置には<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>と<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>の2準位があり,全体で2光子許容遷移は25本ある(1本のみ禁制遷移)。検出の可否の結果を表2にまとめた。Cl原子は18本,Br原子は20本の遷移観測に成功した。Br原子については,真空紫外発光検出できなかったすべての遷移について赤外発光も検出できなかったことから,2光子吸収断面積が小さいことが検出不可の原因であると考えられる。検出できない遷移のうち4本の遷移は両原子に共通であり,上位準位がすべて4重項スピン状態であることから,スピン-軌道相互作用が大きいハロゲン原子でも,スピン禁制が完全に破れていないことが判明した。

表 2. Cl および Br 原子の 2 光子励起真空紫外発光検出の結果

励起準位	Cl	Br
<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>		
<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>		
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>		
<sup>4</sup> D <sub>1/2</sub>	×	×
<sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>		
<sup>2</sup> D <sub>5/2</sub>		
<sup>2</sup> S <sub>1/2</sub>		
<sup>4</sup> D <sub>3/2</sub>		
<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	*	
<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	*	
<sup>4</sup> P <sub>1/2</sub>		
<sup>4</sup> D <sub>5/2</sub>		
<sup>4</sup> D <sub>7/2</sub>	×	
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	*	×
<sup>4</sup> D <sub>1/2</sub>	*	
<sup>4</sup> P <sub>3/2</sub>	×	
<sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>	*	
<sup>2</sup> D <sub>5/2</sub>	*	
<sup>4</sup> P <sub>5/2</sub>	×	×
<sup>2</sup> S <sub>1/2</sub>	*	
<sup>4</sup> D <sub>3/2</sub>	*	×
<sup>4</sup> P <sub>1/2</sub>	*	
<sup>4</sup> D <sub>5/2</sub>	*	
<sup>4</sup> P <sub>3/2</sub>	*	×
<sup>4</sup> P <sub>5/2</sub>	*	×

\*は下位準位が<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>(他は<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>)

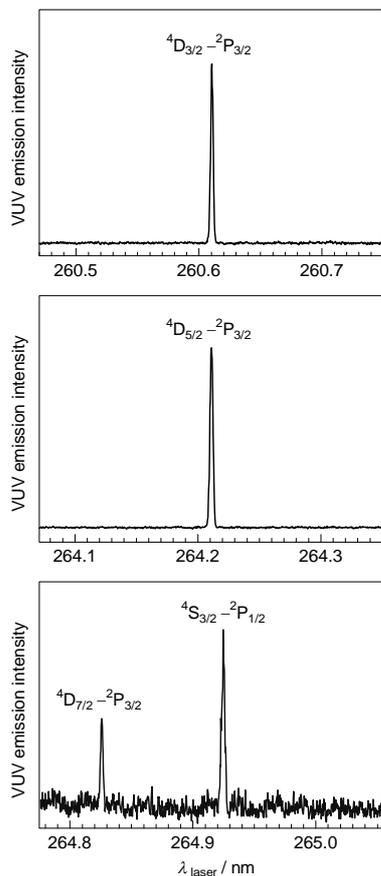


図 5. 臭素原子の2光子励起真空紫外発光検出励起スペクトル。  $p(\text{CHBr}_3) = 1.1 \text{ mTorr}$ ,  $p(\text{He}) = 0.3\text{--}10 \text{ Torr}$ 。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsumi Yoshiaki, Yuta Sugino, Shogo Tendo, Rintaro Fukami, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki	4. 巻 804
2. 論文標題 Rate Coefficients for the CH(X <sub>2</sub> ) + CHX <sub>3</sub> (X = Cl and Br) Reactions and the Propensity of the Reactions of CH with Halomethanes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2022.139879	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 Shogo Tendo, Ayaka Nishimura, Yusuke Ogino, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki	4. 巻 787
2. 論文標題 Detection of Atomic Bromine (4p5 2PJ; J = 1/2, 3/2) by Two-Photon Laser-Induced Vacuum Ultraviolet Emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2021.139253	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 Yuri Kuroko, Mayuu Kanesaki, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki	4. 巻 789
2. 論文標題 Complete Rotational Assignment of the (0,0) Vibrational Band of the A <sub>1</sub> -X <sub>1</sub> + Transition of Carbon Monosulfide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2021.139326	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 Shogo Tendo, Yuki Tanimoto, Takumi Daijogon, Masataka Adaniya, Daigo Kawabata, Kei Kobayashi, Yusuke Ogino, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki	4. 巻 797
2. 論文標題 Overall and State-to-State Quenching of Atomic Oxygen O(2p33p 3PJ) by Collisions with He and N <sub>2</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2022.139508	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 Shogo Tendo, Haruka Tanimoto, Kei Kobayashi, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki	4. 巻 779
2. 論文標題 Nascent Vibrational Distributions of S2(X3 g-) Generated in the S(1D) + OCS Reaction and Vibrational Relaxation by Collisions with He and CF4	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 138841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2021.138841	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 Kawabata Daigo, Tendo Shogo, Kohguchi Hirosh, Yamasaki Katsuyoshi	4. 巻 739
2. 論文標題 Overall and State-Specific Electronic Quenching of Atomic Sulfur S(3p34p 3PJ) by Collisions with He	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 137730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2019.136962	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 Kawabata Daigo, Tendo Shogo, Tanimoto Yuki, Fukami Rintaro, Kohguchi Hiroshi, Yamasaki Katsuyoshi	4. 巻 754
2. 論文標題 Branching Ratios of Electronic Quenching of Atomic Sulfur S(3p34p 3PJ) by Collisions with N2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 137730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2020.137730	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 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 P. Wangchingchai, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Role of the 3s and 3p Rydberg states in the ultraviolet CH3 photodissociation of dimethylamine
3. 学会等名 The 19th Nano Bio Info Chemistry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 采見悠吾, 山口達也, 井上健翔, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Exploration of energy transfer pathways for syn-anti isomers using a full-degrees of freedom analysis approach
3. 学会等名 The 19th Nano Bio Info Chemistry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山圭剛, 望月達人, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 量子状態と衝突エネルギーを制御したイオン分子反応の観測装置の開発と性能評価
3. 学会等名 原子衝突学会年会第47回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山圭剛, 望月達人, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 量子状態と衝突エネルギーを制御したイオン・分子反応観測装置の開発
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 采見悠吾, 山口達也, 井上健翔, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 全自由度解析アプローチによるsyn-anti異性体のエネルギー移動経路の探索
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 P. Wangchingchai, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 ジメチルアミンの光解離反応における3sと3pリドベルグ状態の役割
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樫美里, 奥田悠加, 狩野紅葉, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 配位不飽和金属錯体の分光学的検出による光誘起配位子付加反応の直接的観測
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒河由利, 金崎真悠, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Complete rotational assignment of the (0,0) band of CS(A1 -X1 +) strongly perturbed by the a'3 + state
3. 学会等名 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 P. Wangchingchai, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Role of the 3s and 3p Rydberg states in the ultraviolet CH <sub>3</sub> photodissociation of dimethylamine
3. 学会等名 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥田悠加, 樋美里, 長森啓悟, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Orbital analysis by photodissociation dynamics of dimethylzinc
3. 学会等名 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上健翔, 篠原亮, 采見悠吾, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 二面角ポテンシャルエネルギー曲面による亜硝酸メチルの高回転励起NO生成の考察
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mayuu Kanasaki, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki
2. 発表標題 Reactivity with NH <sub>3</sub> of S(1D) and the yield of HS(X <sup>2</sup> )
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Ogino, Shogo Tendo, Ayaka Nishimura, Hiroshi Kohguchi, Katsuyoshi Yamasaki
2. 発表標題 Rate coefficient for quenching of electronically excited Br(4p45p) by collisions with He
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Peerapat Wangchingchai, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroshi Kohguchi
2. 発表標題 N-CH3 and N-H dissociation pathways from 3p Rydberg state of dimethylamine
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yugo Unemi, Kento Inoue, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroshi Kohguchi
2. 発表標題 Correlation between the vibronic state of methyl nitrite and the vibrational state of NO products in the S1 photodissociation
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuto Mochizuki, Katsuyoshi Yamasaki, Hiroshi Kohguchi
2. 発表標題 Development of guided ion beam apparatus to measure ion rotational and vibrational effects in NO <sup>+</sup> + hydrocarbon systems
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋美里, 中田裕之, 長森啓悟, 松木大, 水田勉, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 遷移金属錯体の光脱離反応における $\mu$ -5-C5H5配位子の電子供与効果
3. 学会等名 分子科学会オンライン討論会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷本佑貴, 大成権匠, 天道尚吾, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Rate coefficients and branching ratio for quenching of O(2p33p 3PJ) by collisions with He.
3. 学会等名 The 17th Nano Bio Info Chemistry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 望月達人, 中田裕之, 長森啓悟, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 量子状態を制御した低速イオン-分子反応測定装置の開発
3. 学会等名 原子衝突学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田裕之, 長森啓悟, 樫美里, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Coordination-specific photoelimination of carbonyl and nitrosyl ligands in transition-metal complex
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樫美里, 中田裕之, 長森啓悟, 松木大, 水田勉, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Photoelimination reaction dynamics of CO and NO from (5-C5H5)W(CO)2NO
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長森啓悟, 中田裕之, 樫美里, 松木大, 水田勉, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Effect of central metal on NO photoelimination reactions of ( $\eta^5$ -C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> )M(CO) <sub>2</sub> NO (M =Cr, Mo, W)
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠原亮, 井上昂輔, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 State distribution of CH <sub>3</sub> and HCO product in ultraviolet photodissociation of N,N-dimethylformamide
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P. Wangchingchai, 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 Photodissociation dynamics study of dimethylamine: CH <sub>3</sub> product detection and theoretical calculations
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林慧, 天道尚吾, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Rate coefficients for vibrational relaxation of S <sub>2</sub> (X <sup>3</sup> g-) by collisions with He
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川端大悟, 天道尚吾, 申鐘植, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Rate coefficients and the mechanism of S(3p34p 3P) quenching of electronically excited by collisions with He and N2
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷本佑貴, 天道尚吾, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Rate coefficient for quenching of electronically excited O(2p33p 3P) by collisions with He
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 遷移金属ニトロシル錯体の光脱離における過渡的屈曲配位構造
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鬼塚侑樹, P. Wangchingchai, 山崎勝義, 高口博志
2. 発表標題 脂肪族アミン光解離反応におけるRydberg/valence相互作用の実験および理論的研究
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上昂輔, 篠原亮, 山崎勝義, 鬼塚侑樹, 高口博志
2. 発表標題 N,N-ジメチルホルムアミドの紫外光解離反応におけるCH <sub>3</sub> /HCO放出経路の同定
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川端大悟, 天道尚吾, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Overall rate coefficient and branching ratio for quenching of S(3p34p 3PJ) by collisions with He
3. 学会等名 The 16th Nano Bio Info Chemistry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深水凜太郎, 川端大悟, 谷本佑貴, 天道尚吾, 高口博志, 山崎勝義
2. 発表標題 Rate coefficients for vibrational relaxation of C <sub>2</sub> H(X <sup>2+</sup> ) by collision with He
3. 学会等名 The 16th Nano Bio Info Chemistry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計20件

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2021年
2. 出版社 広島大学出版会	5. 総ページ数 447
3. 書名 詳説 物理化学Monographシリーズ(上)	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2021年
2. 出版社 広島大学出版会	5. 総ページ数 419
3. 書名 詳説 物理化学Monographシリーズ(中)	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2021年
2. 出版社 広島大学出版会	5. 総ページ数 419
3. 書名 詳説 物理化学Monographシリーズ(下)	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本化学会	5. 総ページ数 4
3. 書名 高等学校教科書「化学」における化学平衡および平衡定数の記述	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本化学会	5. 総ページ数 6
3. 書名 化学平衡の熱力学と平衡定数の表記	

1. 著者名 山崎勝義 他262名	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 1500
3. 書名 化学便覧 基礎編 改訂6版	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2020年
2. 出版社 蛋白質科学会	5. 総ページ数 8
3. 書名 標準反応エンタルピー $rH^\circ$ の単位 $J\ mol^{-1}$ の $mol$ の意味	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2023年
2. 出版社 漁火書店	5. 総ページ数 39
3. 書名 統計理論によるprior分布の導出	

1. 著者名 山崎勝義	4. 発行年 2022年
2. 出版社 漁火書店	5. 総ページ数 78
3. 書名 占有数表示(Fock表示)の演習問題	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者(山崎)研究室研究内容 <a href="https://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/pages/results/">https://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/pages/results/</a> 反応物理化学研究室 <a href="http://pchem.hiroshima-u.ac.jp/">http://pchem.hiroshima-u.ac.jp/</a> 物理化学の解説書「詳説 物理化学Monographシリーズ」(30タイトル, 総ページ数1290)を代表者のwebサイトで無料配布している <a href="http://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/pages/results/monograph/">http://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/pages/results/monograph/</a> 広島大学学術情報リポジトリ 注目コンテンツ <a href="https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/featured_content/1">https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/featured_content/1</a>
---

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------