

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25410018

研究課題名(和文) 化学反応速度式の解析解を用いない新しい反応速度決定法の確立

研究課題名(英文) A new method for determining rate coefficients without using analytical solution of rate equations

研究代表者

山崎 勝義 (Yamasaki, Katsuyoshi)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90210385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：多段階で進行する化学反応の各段階の速さは物理化学の教科書に書かれている方法では正確に決定することができない。研究代表者は問題解決を目指して微分方程式を解く必要がないシンプルな速度解析法を新規に開発・確立した。新解析法を実験データ解析に応用し、電子励起原子の反応過程と消光過程の速度定数と分岐比、および振動励起分子の多段階緩和過程の速度定数の決定に成功した。さらに、振動エネルギー移動過程に関する一般則を導出するとともに振動励起分子の化学反応に対する加速効果を見出し、本研究で確立した新しい反応速度解析法の有用性と汎用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The rate of each step in a multistep reaction cannot be determined by the method described in the textbooks of physical chemistry. The principal investigator has developed and established a new and simple method for kinetic analysis without solving rate equations. The new method of analysis has made it possible to determine the rate coefficients for reaction and quenching of electronically excited atoms and for multistep relaxation of vibrationally excited molecules. In addition, we have derived a general rule of vibrational energy transfer and found that the vibrational excitation of reactants is effective in enhancing chemical reactions. The findings of this research show that the new method of kinetic analysis is valuable and used for various purposes for the studies on chemical kinetics and dynamics.

研究分野：反応物理化学

キーワード：反応速度定数 振動励起分子 振動緩和 振動エネルギー移動 2光子励起 反応分岐比 消光過程 信号応答理論

1. 研究開始当初の背景

化学反応の速さの指標である反応速度定数は、注目する物質濃度の時間変化を観測し、反応速度式の解析解である数式によるフィッティングで決定されている。しかし、解析解が得られない場合や反応に関係する物質の濃度が未知である場合には、正確な速度定数を決定することができないという問題点がある。従来型のフィッティング法の限界を打ち破ることは化学反応の速度論的研究における悲願とも呼べる課題であるが、国内外において新しい試みは提案されていない。プロセス工学での反応槽の濃度動特性および直列 RC 回路の信号応答特性が多段逐次反応過程における物質濃度の時間変化と等価であることを研究代表者が見出し、反応速度定数を隣接する二つの化学種のみでの時間変化から決定する独創的方法を着想したことが本研究を開始した背景である。

2. 研究の目的

多段階で進行する化学反応の速度定数を、反応速度式の解析解を使用せずに決定する新しい速度解析法の確立を目的とする。プロセス工学や電気回路信号応答理論を化学反応の速度解析に応用し、従来型の解析解を用いるパラメータフィッティング法の問題点を克服することが最大の目標である。150 年を超える反応速度研究の歴史において、反応速度式を解くことなく速度定数を決定するという着想は例がなく、類似の試みさえ存在しない。本研究では、多段階過程の典型例である逐次反応および振動緩和過程を対象として測定を行い、独自に開発したソフトウェアを利用して速度定数を決定し、新規かつ汎用な速度定数決定法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

信号応答理論にもとづく反応速度解析ソフトウェアの開発を行い、解析結果へのデータノイズの影響や適用限界濃度などを評価する。実験面では 2 原子分子(OH, S<sub>2</sub>)の高振動励起状態の生成・検出を行い、非反応性分子(貴ガス, CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>)との衝突により進行する多段階振動緩和過程を実時間観測する。特定の振動準位上の分子占有数の経時変化データを解析し、各段の速度定数の決定を試みると同時に解析アルゴリズムの改良を行う。2 年目以降は、対象を 3 原子分子(NH<sub>2</sub>)に拡張し、化学反応および振動エネルギー移動の速度論的解析を行う。

4. 研究成果

(1) 反応速度解析プログラムの構築

観測データの逆重畳積分計算による速度定数決定、および重畳積分計算による観測データの再現チェックを行うためのソフトウェアを作成した。制作したソフトウェアの解析誤差を評価した結果、±30%程度

のランダムノイズがある場合でも正確な速度解析が可能であることが判明した。また、注目する 2 物質(成分)が 10 : 1 の濃度比であっても解析結果の誤差は高々 1%であることを確認した。

(2) OH(v) + He 系

比較的低い振動準位(v=1~4)のOHラジカル(以下、OH(v))への貴ガス分子の衝突による緩和過程は非常に遅く測定が困難であるため速度定数の報告値がない。本研究で構築した新規な速度解析法を応用して、振動準位 v=1~4 への He の衝突による緩和速度定数の決定を試みた。O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/He 混合気にて 266 nm レーザ光を照射し、O(<sup>1</sup>D) + H<sub>2</sub> 反応により振動励起 OH ラジカル(準位: v=0~4)を生成した。OH の各振動準位は A<sup>2</sup> + - X<sup>2</sup> 電子遷移にもとづくレーザ誘起蛍光(LIF)法により選択的に検出した。光解離レーザと検出レーザの照射時間間隔を掃引して得た各準位の LIF 強度経時変化(図 1)について、隣接 2 振動準位のデータを解析し、1 量子緩和過程(v → v-1)の速度定数を決定した。その結果、OH(v)の He による緩和の衝突効率 v=1~4 の範囲で 10<sup>-6</sup>~10<sup>-5</sup>、つまり、10 万~100 万回に 1 回の確率で起こることが明らかになった。また、本研究で測定した低振動準位の緩和速度定数と高振動準位(v=10~12)に関する過去の報告値が exponential gap 則に従うよい相関

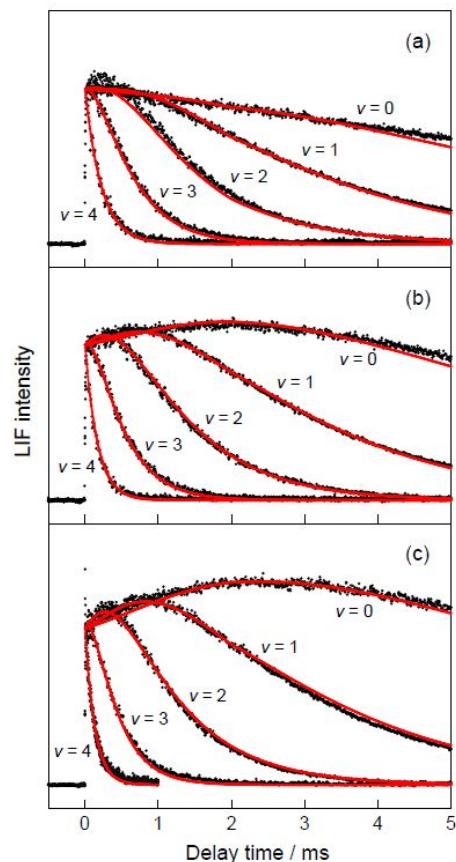


図 1. OH(X<sup>2</sup>, v=0~4)のLIF強度経時変化の全圧依存性。全圧(He): (a) 70, (b) 100, (c) 130 Torr。●:観測データ, ○:シミュレーション。

を示すことを見出した。

### (3) S(<sup>1</sup>D) + OCS 反応系

S(<sup>1</sup>D) + OCS → S<sub>2</sub> + CO 反応の経路として、エネルギー的には電子基底状態 S<sub>2</sub>(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>)と励起状態 S<sub>2</sub>(a<sup>1</sup><sub>g</sub>)両方の生成が可能である。しかし、電子スピン保存則に従えば、a<sup>1</sup><sub>g</sub>しか生成しない。また、S(<sup>1</sup>D) + OCS 反応の速度定数の報告値は約 1.3 × 10<sup>-10</sup> と約 3.0 × 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup> molecule<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> の二グループに分かれており確定していない。本研究では、S<sub>2</sub>の二つの電子状態を検出し、総括生成速度の測定を行い、両電子状態が同時に生成しているかどうかを確定することを目的とした。S(<sup>1</sup>D)原子をOCSの248 nm光解離により生成し、OCSとの反応により系内に生成するS<sub>2</sub>(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>, a<sup>1</sup><sub>g</sub>)をそれぞれB<sup>3</sup><sub>u</sub><sup>-</sup> - X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>およびf<sup>1</sup><sub>u</sub> - a<sup>1</sup><sub>g</sub>遷移にもとづくLIF法により検出した。S<sub>2</sub>自身およびSOの振動バンドとの重複により単一振動準位の検出が困難であったため、分散LIFを観測する工夫を施して実験を遂行した。過去に、S(<sup>1</sup>D) + OCS → S<sub>2</sub> + CO 反応で生成するS<sub>2</sub>は、X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>状態がv=0のみ、a<sup>1</sup><sub>g</sub>状態はv=6が最高生成振動準位であると報告されていたが、本研究によりX<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>はv=19、a<sup>1</sup><sub>g</sub>はv=11まで生成していることを見出した。さらに、S<sub>2</sub>(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>, v=1)の濃度が化学反応により増加する時間領域について経時変化のOCS濃度依存性を測定し(図2)、速度解析の結果、S(<sup>1</sup>D) + OCS 反応の総括速度定数として3.2 × 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup> molecule<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>を得た。したがって、過去の報告のうち速い方の速度定数を支持する値となった。また、同様の測定をS<sub>2</sub>(a<sup>1</sup><sub>g</sub>, v=1)について行ったところ、S<sub>2</sub>(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>, v=1)と同一の速度定数が得られたことから、S(<sup>1</sup>D) + OCS 反応により二電子状態(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>, a<sup>1</sup><sub>g</sub>)が同時に生成するこ

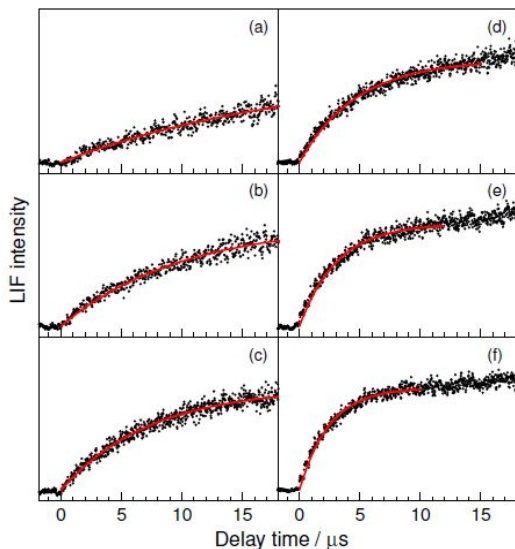


図2. S<sub>2</sub>(X<sup>3</sup><sub>g</sub><sup>-</sup>, v=1) LIF強度経時変化のOCS圧依存性。OCS圧力:(a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 30, (f) 40 Torr. ●:観測データ, —:シミュレーション。

とを実証した。本成果を米国化学会発行のJ. Phys. Chem. Aに投稿し掲載された。

### (4) S(<sup>1</sup>D)およびS(<sup>3</sup>P)の2光子LIF検出

S(<sup>1</sup>D) + OCS 反応の経路には化学反応の結果S<sub>2</sub> + COを生成する過程とS(<sup>1</sup>D)が電子基底状態のS(<sup>3</sup>P)に消光される経路(S(<sup>3</sup>P) + OCS)が存在する。この2経路それぞれの速度定数(分岐比)を決定するためにはS(<sup>1</sup>D)およびS(<sup>3</sup>P)を直接検出する必要がある。本研究では、両電子状態の2光子励起レーザー誘起蛍光(2P-LIF)法による検出を試みた。S(<sup>1</sup>D)の検出には、288.16 nm光の2光子吸収により4p<sup>1</sup>F状態に励起後4s<sup>1</sup>D状態に赤外遷移し、166.7 nmの真空紫外発光により元の<sup>1</sup>D状態に戻る過程を利用した。一方、S(<sup>3</sup>P)については、308~311 nm光により4p<sup>3</sup>P状態に2光子励起後4s<sup>3</sup>S状態に赤外遷移し、180.7~182.6

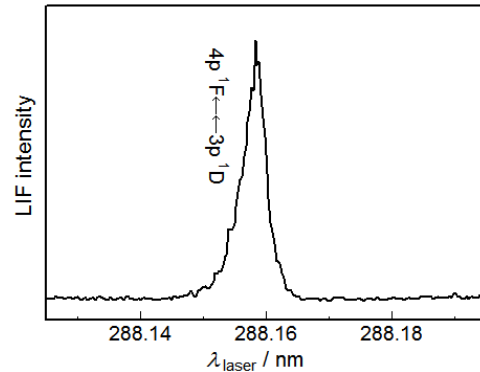


図3. S(<sup>1</sup>D)の2P-LIF励起スペクトル。

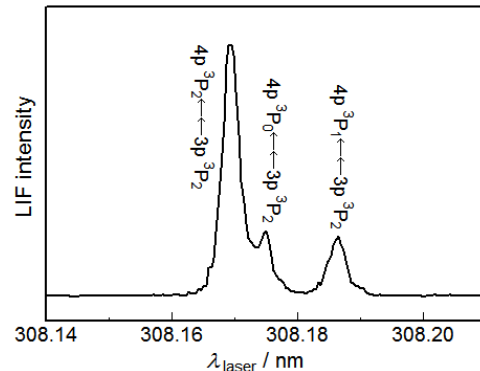


図4. S(<sup>3</sup>P)の2P-LIF励起スペクトル。

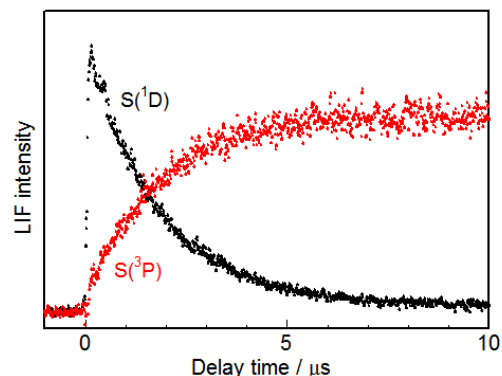


図5. S(<sup>1</sup>D)とS(<sup>3</sup>P)のLIF強度経時変化。OCS圧力=60 mTorr, 全圧(He)=3 Torr。

nm の真空紫外発光により  $^3P$  に戻る過程を利用して検出に成功した(図3,4)。また,  $S(^1D)$  の OCS との反応・消光による減衰と消光により  $S(^3P)$  が生成する経時変化を観測した結果(図5), OCS の 248 nm 光解離の生成物はほぼ 100% が  $S(^1D) + CO$  であることが明らかになった。また,  $S(^1D)$  の高効率消光剤である  $N_2$  の添加にともなう  $S(^3P)$  の生成量の変化を観測し,  $S(^1D) + OCS$  反応の経路のうち, 消光過程 ( $S(^3P) + OCS$ ) の寄与が 74% であることを明らかにした。本成果は平成 28 年開催の国際学会(32th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics(大宮))で発表する。

(5)  $S_2(v) + He, SF_6$  系

$O_2$  の振動エネルギー移動に関する速度論的研究例は多いが, 同族の硫黄分子( $S_2$ )の研究例はない。(3)で示したように,  $S_2$  の  $X^3 \sigma_g^-$  および  $a^1 \sigma_g$  状態がそれぞれ  $v=19$  および 11 まで振動励起している事実を利用して,  $S_2$  の振

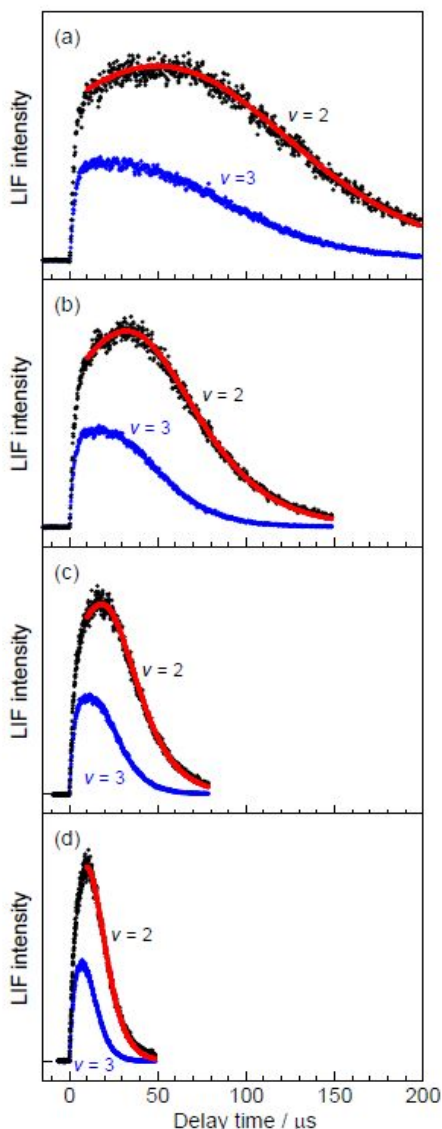


図6.  $S_2(a^1 \sigma_g, v=2, 3)$  の LIF 強度経時変化の He 圧依存性。He 圧力: (a) 5, (b) 10, (c) 20, (d) 40 Torr。●: 観測データ, ○: シミュレーション。

動緩和速度定数の測定を試みた。各振動準位の LIF 強度経時変化から振動緩和の兆候が見られたので OCS による緩和を予想したが, 経時変化は OCS 濃度に依存せず, 緩和を進行させている衝突体は He であることが明らかになった。全圧(He 圧)を変化させて  $S_2(a^1 \sigma_g)$  の振動準位 ( $v=1 \sim 9$ ) の経時変化を観測し(図6は  $v=2, 3$ ), 本研究で構築した解析法を適用したところ, 緩和速度定数は振動準位の上昇にともなって増大し,  $v=1 \sim 9$  について  $6.3 \times 10^{-14} \sim 1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$  となり,  $O_2$  よりも 1 桁以上高い衝突効率であることが判明した。 $O_2$  の他に比較的広範囲の振動準位に関する速度定数の報告値がある NO, CO, OH と比較したところ, He との衝突 1 回あたりの緩和効率が分子振動の準位間隔(エネルギーギャップ  $E_v$ )に対して指数関数的に変化する exponential gap 則に従って OH 以外の 4 種の分子の結果が結びつくことを明らかにした(図7)。OH が他の 4 分子と異なる挙動を示すことは, 永久双極子モーメントの大きさの相違(OH のモーメントが非常に大きい)にもとづいて説明することができる。

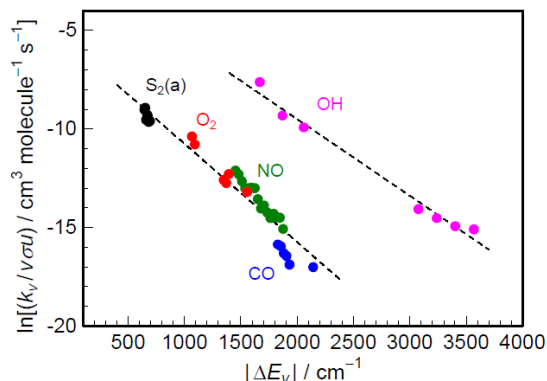


図7. 衝突1回あたりの緩和確率のエネルギーギャップ  $E_v$  依存性。

また, 衝突分子を単原子分子から多原子分子に拡張し,  $S_2(X^3 \sigma_g^-)$  については  $v=1$  と 2,  $S_2(a^1 \sigma_g)$  については  $v=1 \sim 4$  の  $CF_4$  および  $SF_6$  による振動緩和を観測した。衝突前後のエネルギーギャップの点では,  $CF_4$  が  $SF_6$  より有利であるにもかかわらず, エネルギー移動速度は  $SF_6$  の方が約 5 倍程度速いことを見出し, 振動-振動間のエネルギー移動の効率を決める因子としてエネルギーギャップ以外に衝突分子の振動モードの赤外光吸収断面積(吸光係数)が重要であることを明らかにした。この成果は平成 28 年に開催される国際学会 2 件(32th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics(大宮)および 24th International Symposium on Gas Kinetics and Related Phenomena(York, 英国))にて発表する。

(6)  $NH_2 + NO$  系

3 原子分子への拡張として  $NH_2$  分子の化学反応と緩和過程を対象とした。 $NH_2 + NO$  反応

には次の三つの生成経路 (a)  $\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ , (b)  $\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2$ , (c)  $\text{N}_2 + \text{H} + \text{OH}$  がある。これらのうち、(a)は振動励起していない  $\text{NH}_2$  から生成し、(b)は振動励起している  $\text{NH}_2$  から生成していることが報告されている。しかし、経路(c)に関する  $\text{NH}_2$  の振動励起効果については報告例がない。本研究では、振動励起  $\text{NH}_2$  に対する緩和剤として  $\text{CF}_4$  がきわめて有効であることを見出し、 $\text{NH}_2 + \text{NO}$  反応系で生成する OH 収率の系内  $\text{CF}_4$  濃度に対する依存性を測定し、経路(c)への  $\text{NH}_2$  振動励起効果を検証した。 $\text{NH}_3/\text{NO}$  混合気 に 193 nm レーザ光を照射して  $\text{NH}_2 + \text{NO}$  反応を開始させ、系内に生成する  $\text{OH}(X^2, v=0)$  を LIF 法により検出した。系内に添加する  $\text{CF}_4$  濃度を変化させ、OH 生成収率を測定したところ、 $\text{CF}_4$  の増加にともなって OH の減少が観測された(図 8)。この結果から、

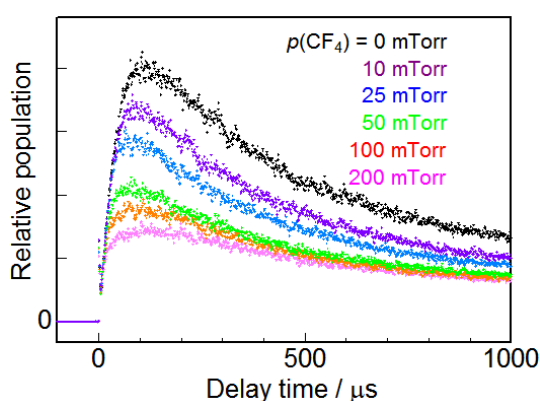


図 8.  $\text{NH}_2 + \text{NO}$  反応で生成する OH に対する  $\text{CF}_4$  添加効果.

$\text{NH}_2$  の振動励起が経路(c)に対して加速効果をもつことが明らかになった。また、従来、室温条件での経路(c)の収率は約 10 %とされてきたが、193 nm による  $\text{NH}_3$  の光解離直後の  $\text{NH}_2$  から進行する場合には、収率が 23 %に増加することを見出した。以上の成果を Chem. Phys. Lett. 誌に投稿し掲載された。

#### 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 3 件)

1. 河野七瀬, 渡辺昭敬, 石部真里, 小林秀雄, 高口博志, 山崎勝義, Enhancement of the  $\text{NH}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{H} + \text{N}_2$  Reaction by Vibrational Excitation of  $\text{NH}_2$ , Chem. Phys. Lett., 査読有, 2015, Vol. 638, pp. 227-232, DOI: 10.1016/j.cpllett.2015.08.058

2. 山下潤, 藤原圭吾, 高橋修, 高口博志, 山崎勝義, Kinetics and Dynamics on the Formation of  $\text{S}_2(X^3, a^1)$  in the  $\text{S}(^1\text{D}) + \text{OCS}$  Reaction, J. Phys. Chem. A, 査読有, 2014, Vol. 118, No. 40, pp. 9330-9337, DOI: 10.1021/jp504912j

3. 山下潤, 後藤寛貴, 藤原圭吾, 原彩乃, 高口博志, 山崎勝義, Vibrational Relaxation of  $\text{S}_2(a^1, v=1-9)$  by Collisions with He, Chem. Phys. Lett., 査読有, 2016, Vol. 657, pp. 95-101, DOI: 10.1016/j.cpllett.2016.05.063

[学会発表](計 32 件)

1. 発表者名: 原彩乃, 後藤寛貴, 内山太, 高口博志, 山崎勝義, Kinetic Study on the Relaxation of Vibrationally Excited  $\text{S}_2(a^1)$  by Collisions with  $\text{SF}_6$ , 24th International Symposium on Gas Kinetics and Related Phenomena, 2016年7月17日~21日, University of York(York(イギリス))(確定)

2. 後藤寛貴, 谷本遥, 宮地信和, 高口博志, 山崎勝義, Detection of Sulfur Atoms ( $^1\text{D}$  and  $^3\text{P}$ ) and Branching Ratio between Reaction and Quenching in the  $\text{S}(^1\text{D}) + \text{OCS}$  System, 32nd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2016年6月2日, 大宮ソニックシティ(さいたま市)(確定)

3. 原彩乃, 後藤寛貴, 内山太, 高口博志, 山崎勝義, Kinetic Study on the Vibrational Relaxation of  $\text{S}_2(a^1)$  by Collisions with  $\text{SF}_6$ , 32th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2016年6月2日, 大宮ソニックシティ(さいたま市)(確定)

4. 鬼塚侑樹, 山崎勝義, 高口博志, Identification of the Electronically Excited  $\text{NH}_2$  Product in the Photodissociation of Methylamine, 2016年6月2日, 大宮ソニックシティ(さいたま市)(確定)

5. 住田聖太, 山崎勝義, 高口博志, Dynamics Study of Multiple Product Pathways in the Photodissociation of Nitromethane, The 12nd Nano Bio Info Chemistry Symposium, 2015年12月5日, 広島大学(東広島市)

6. 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, 2015年9月19日, 東京工業大学(東京都・大岡山)

7. 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, 2015年9月19日, 東京工業大学(東京都・大岡山)

8. 加藤光枝, 益本修, 山崎勝義, 高口博志, 状態選別散乱分布測定による  $\text{CH}_3\text{ONO}$  光解離反応のエネルギー分配の決定, 第9回分子科学討論会, 2015年9月16日, 東京工業大学(東

京都・大岡山)

9. 山崎勝義, Chemical Reaction and Energy Transfer of Vibrationally Excited Molecules, Japan-Asia Youth Exchange Program in Science, 2015年8月5日, 広島大学(東広島市)

10. 住田聖太, 山崎勝義, 高口博志, Dynamics Study of the Photodissociation of Nitromethane following the Excitation, Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy 2015年7月19日, 東京大学(東京都・駒場)

11. 住田聖太, 花田拓也, 山崎勝義, 高口博志, Site-selective Photochemistry Observed for Allyl Iodide, Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, 2015年7月19日, 東京大学(東京都・駒場)

12. 後藤寛貴, 藤原圭吾, 山下潤, 高口博志, 山崎勝義, Rate Coefficients for Vibrational Relaxation of  $S_2(a^1_g, v=9)$  by Collisions with He, 31st Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2015年6月4日, 北海道大学(札幌市)

13. 住田聖太, 山崎勝義, 高口博志, Dynamics Study of the Photodissociation of Nitromethane following the Excitation, 31st Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2015年6月4日, 北海道大学(札幌市)

14. 鬼塚侑樹, 柳井谷拓馬, 山崎勝義, 高口博志, Dependence of the Product Pathways in the Photodissociation of Methylamine on the Available Energy, 31st Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2015年6月4日, 北海道大学(札幌市)

15. 門築ちひろ, 河野七瀬, 篠原美夜, 高口博志, 山崎勝義, Kinetic Study on the Vibrational Excited  $OH(X^2)$  by Collisions with Rare Gases, The 11th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 2014年12月13日, 広島大学(東広島市)

16. 藤原圭吾, 山下潤, 高口博志, 山崎勝義, Kinetic Study on the Relaxation of by  $S_2(a^1_g, X^3_g)$  Collisions with He, The 11th Nano Bio Info Chemistry Symposium, 2014年12月13日, 広島大学(東広島市)

17. 住田聖太, 高下慶典, 山崎勝義, 高口博志, The Multichannel Photodissociation Dynamics of Nitromethane ( $CH_3NO_2$ ) Studied by the State-resolved Ion Imaging, 2014年12月13日, 広島大学(東広島市)

18. 門築ちひろ, 河野七瀬, 篠原美夜, 高口博志, 山崎勝義, 振動励起 OH の He および Ar による緩和過程の速度論的研究, 第8回分子科学討論会, 2014年9月24日, 広島大学(東広島市)

19. 鬼塚侑樹, 高下慶典, 山崎勝義, 高口博志, 状態選別散乱分布測定によるメチルアミンの光解離機構の動力学研究, 第8回分子科学討論会, 2014年9月22日, 広島大学(東広島市)

20. 住田聖太, 花田拓也, 山崎勝義, 高口博志, ヨウ化アリルのサイト選択的な光学観測, 第8回分子科学討論会, 2014年9月22日, 広島大学(東広島市)

21. 鬼塚侑樹, 高下慶典, 山崎勝義, 高口博志, Elucidation of Photodissociation Mechanism of Methylamine by REMPI Spectroscopy and Ion Imaging Experiment, 30th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2014年6月5日, イーグレ姫路(姫路市)

22. 門築ちひろ, 河野七瀬, 篠原美夜, 高口博志, 山崎勝義, Kinetic Study on the Vibrational Relaxation of  $OH(X^2)$  by Collisions with He and Ar, 30th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2014年6月4日, イーグレ姫路(姫路市)

学会発表 他 10 件

〔図書〕(計 2 件)

1. 山崎勝義, 広島大学出版会, 物理化学 Monograph シリーズ(上) 第1版 第4刷 2015, 400

2. 山崎勝義, 広島大学出版会, 物理化学 Monograph シリーズ(下) 第1版 第4刷 2015, 485

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者 URL

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/>

研究代表者研究グループ URL

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/pchem/>

物理化学 Monograph シリーズ URL

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kyam/pages/results/monograph/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 勝義 (YAMASAKI KATSUYOSHI)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 90210385