

しきい光電子源を用いた超低エネルギー電子-HD 衝突全断面積の測定

奥村拓馬¹, 江尻智一¹, 穂坂綱一¹, 北島昌史¹, 小田切丈², 星野正光²¹東工大院理工, ²上智大理工**The measurements of the total cross sections for ultra-low energy electron scattering from HD employing the threshold electron source**Takuma OKUMURA¹, Tomokazu EJIRI¹, Kouichi HOSAKA¹, Masashi KITAJIMA¹, Takeshi ODAGIRI², Masamitsu HOSHINO²,¹Department of Chemistry, Tokyo Institute of Technology,²Department of Materials and Life Science, Sophia University**Abstract**

衝突エネルギーが極めて低い電子-分子衝突では、電子と標的分子との衝突時間が分子の振動・回転運動の時間スケールに近づき、入射電子と分子の運動が結合して特異な衝突ダイナミクスが発現することが期待される。本研究では、放射光の二次ビームとして高品位の電子ビームを生成するしきい光電子源を用いて、 H_2 とその同位体 HD, D_2 を標的とした超低エネルギー電子衝突実験を行った。その結果、衝突エネルギー 80 meV を下回るような超低エネルギー領域において、電子衝突全断面積上にこれまでの衝突モデルでは認識されてこなかった同位体効果が存在することが分かった。

1. はじめに

電子と原子・分子の衝突過程は、粒子間の支配的な相互作用が Coulomb 力と既知であることから、量子力学における散乱理論の検証の場として広く研究されてきた。また、電子-原子・分子衝突過程の理解は、種々の反応素過程の解明をはじめ、地球や惑星の高層大気科学、反応性プラズマなどの種々のプラズマ中での素過程、物質や生体への放射線作用の解明など、広範な分野における基礎としても極めて重要な役割を果たしている [1]。電子-原子・分子衝突の衝突断面積は、散乱実験と散乱理論をつなぐ重要な物理量であるだけでなく、これらの様々な応用分野において必須の量でもある。

電子と原子・分子の衝突の中でも、電子-分子衝突は多中心系である分子に関わる最もシンプルな衝突過程であり、原子にはない自由度である分子の振動・回転が衝突過程に与える影響は興味深い。一般に、電子-分子衝突において、分子の振動・回転運動の時間スケールは衝突時間よりもはるかに長く、分子の運動を衝突過程と分離する描像が良い近似とされている [2]。例えば、分子振動・回転の周期の時間スケールはそれぞれ $10^{-13} \sim 10^{-14}$ s, $10^{-11} \sim 10^{-12}$ s ほどであるが、100 eV の電子による衝突時間は $10^{-17} \sim 10^{-16}$ s であり、衝突はほぼ瞬間的に起こると見なせる。ここで、電子の衝突エネルギーを下げるとそれに伴い衝突時間も長くなり、meV オーダーの衝突エネルギーでは、衝突時間が分子振動・回転の時間スケールに比べて無視できない程度となる。このため、超低エネルギー電子衝突では、入射電子と分子振動・回転が強く結合

する特異な衝突ダイナミクスの発現が期待される。

これまで、一般的な電子衝突実験では、フィラメントから放出される熱電子を電子ビーム源として用いてきた。しかしながら、熱フィラメントによる電子ビームは数 100 meV 程度のエネルギー拡がりを持つため、100 meV を下回るような超低エネルギーまで減速すると電子ビームが発散してしまう。また、気相標的を用いる実験では、標的分子と入射電子の衝突領域を確保するために長焦点の電子ビームが必要である。これらの理由から、フィラメントを電子源として、100 meV を下回る超低エネルギー電子ビームを得るのは困難である。そこで、我々のグループでは、放射光の二次ビームとして高品質の電子ビームが得られることに着目し、放射光を利用したしきい光電子源を新たに開発し [3,4]、希ガス原子 [5-7] や窒素分子 [8] を標的として、10 meV を下回る超低エネルギー領域を含む広いエネルギー範囲で、電子衝突全断面積の測定を行ってきた。ここで電子衝突全断面積は、弾性衝突断面積および起こり得る全ての非弾性衝突過程に関わる部分断面積の和であり、ほかの断面積に比べてその絶対値を正確に測定することが可能である。

本稿では、現在我々が取り組んでいる水素分子 H_2 とその同位体 HD, D_2 を標的とした超低エネルギー電子衝突実験の現状について報告する。水素分子は質量が小さく、分子振動・回転エネルギーが比較的大きいため、超低エネルギー領域のうちでは比較的高いエネルギーにおいて、分子振動・回転運動を電子衝突過程と分離する描像が成り立たなくなることが期待される。また、水素分子同位体で分

子振動・回転の効果の大きさはそれぞれ異なると考えられる。H₂を標的とした低エネルギー電子衝突実験は過去に多く行われているが[9-17]、一方でHD、D₂を標的とした測定はほとんどない[9,10]。唯一、1980年にFerchらが20 meV ~ 1.5 eVのエネルギー範囲でH₂、HD、D₂の電子衝突全断面積を測定しているが、彼らは実験精度の範囲でこれらの分子の全断面積の間に有意な差は見出されなかったと報告している[10]。そこで、従来よりも高い精度で電子衝突全断面積の測定を行うため、我々のグループでは実験装置の改造と測定法の改良を行った。本稿では、まず上記の実験手法の改良について紹介し、その後現在測定中の電子衝突全断面積について、その結果を紹介する。

2. 実験装置と電子衝突全断面積の測定法

実験装置の概略をFig. 1に示す。実験はKEK-PFの高分解能真空紫外分光ビームラインBL-20Aで行った。実験装置は大きく分けて、光イオン化セル、電子レンズ系、衝突セル、電子検出器の4つの要素から構成されている。光イオン化セルにArを充填し、第一イオン化ポテンシャルに相当する単色放射光を照射する。Arの光イオン化により放出されたしきい光電子(ほぼ0 eV)を浸み出し電場により捕集し、静電レンズ系(1st lens)でビームに整形する。浸み出し電場法はしきい光電子分光測定で広く用いられている手法であり、非常に緩やかな電位勾配によりゼロエネルギーの電子のみを選択的に捕集することが可能である[18]。1st lensにより整形した電子ビームを2nd lensで目的のエネルギーまで加減速し、標的分子を充填した衝突セルに照射する。標的分子と衝突せずに衝突セルを透過した電子ビームを3rd lensを通して電子検出器で検出し、次の透過減衰法に従い電子衝突全断面積の絶対値 $\sigma(E)$ を決定する。

$$\sigma(E) = - (nL)^{-1} \ln \{ I(E) / I_0(E) \} \quad (1)$$

ただし、 E は衝突エネルギー、 n は衝突セル中の標的分子の数密度、 L は衝突セルの有効長、 $I_0(E)$ と $I(E)$ は衝突セルへの標的分子導入前後における電子ビーム透過強度である。

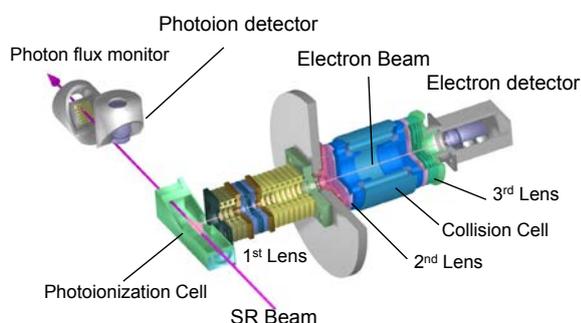


Figure 1 Overview of the present experimental system. The setup consists of a photoionization cell, an electron scattering apparatus, and a photon flux monitor. The electron scattering apparatus involves three lens systems, a collision cell, and an electron detector.

実験装置は、真空チェンバー中の二重の磁気シールド内に組み込まれている。また、真空チェンバー内は、光イオン化セルを含む区画と静電レンズ系・衝突セル・電子検出器を含む区画の2つに分けられており、それぞれの区画で差動排気を行うことで、標的分子が光イオン化セル内に流れ込むことを防いでいる。

しきい光電子源では、しきい光電子と浸み出し電場を組み合わせることで、高分解能・低エミッタンスの電子ビームを得ることができる。また、しきい光電子源は、標的分子存在下での電子ビームの安定性の面でもフィラメントを始めとする熱電子源に比べて優れている。透過減衰法では、電子衝突全断面積を決定するために、標的分子が存在するときの透過電子ビーム強度 $I(E)$ と存在しないときの透過電子ビーム強度 $I_0(E)$ を同一の実験条件で測定する必要がある。フィラメントからの熱電子放出の状態は、フィラメント近傍の標的分子数がわずかでも変動すると大きく変化し、同一実験条件で $I(E)$ と $I_0(E)$ を測定するのは困難であり常に問題となってきた。今回標的とする水素分子は軽いため拡散が速く、差動排気を用いてもフィラメント近傍への水素分子の侵入を防ぐことは難しいほか、後述する電極への吸蔵の問題もあるため、上記問題が顕在化しやすい。一方、しきい光電子源では、光イオン化セル内に標的分子がわずかに侵入してもその影響は無視でき、熱電子源の場合に比べて高い精度での電子衝突全断面積の測定が可能である。

本研究ではさらに、電子衝突全断面積測定の精度向上を目指して、衝突セルの長さを30 mmから45 mmへ伸長した。これは、水素分子の電子衝突全断面積への同位体効果は小さいことが予想されるため、同位体効果を議論するには従来よりも高い精度で電子衝突全断面積を決定する必要があると考えたためである。衝突セル長を伸ばすと、電子ビームがセルを通過する間に標的ガスと衝突する確率が増すので、全断面積測定の感度が向上する。また、透過減衰法では、前方(散乱角 $\approx 0^\circ$)に散乱された電子も透過電子ビーム強度 $I(E)$ に寄与するため、全断面積を過小評価してしまうことがあるが、衝突セル長を伸ばすことで前方散乱の寄与を低減させることができる。なお、実際に(1)式で用いるのは幾何学的なセル長ではなく、衝突セル出入口のアーチャーからの標的分子の漏れを補正した有効長 L である。有効長 L は、我々のグループが過去に測定したKrの電子衝突全断面積[4]を用いて決定し、幾何学的なセル長よりも短い $L=44.4$ mmとした。

今回標的とする水素分子は金属に吸蔵されるため、水素分子を衝突セルに導入すると、電極の表面電位が大きく変化して静電レンズ系の状態が大きく変わることが実験中に確認された。このため、水素分子に対する実験では同一のレンズ条件で $I(E)$ と $I_0(E)$ を測定することが困難となったが、多くのスタディの結果、我々が用いている圧力範囲(数mTorr)では水素分子のガス圧にはほとんど依存せず、衝突セル中の水素が空のときのみ電極の表面電位が変化していることが分かった。これは、衝突セル中の水素分子を排

気すると吸蔵されていた水素がゆっくりと抜けていくためだと考えられる。そこで、本研究では衝突セルに常に水素分子を充填し、水素分子の圧力を変化させながら透過電子ビーム強度の測定を行うことで、電子衝突全断面積を決定した。透過減衰法の式 (1) は次のように変形することができる。

$$-\ln I(E) = \sigma(E)nL - \ln I_0(E) \quad (2)$$

すなわち、 $\ln I(E)$ と標的分子の数密度 n は線形関係にあり、 $\ln I(E)$ vs n のグラフの傾きから電子衝突全断面積を求めることが可能である。更に、標的分子の圧力を変えた測定を何点か行うことで、 $I(E)$ と $I_0(E)$ のみを用いる場合よりも正確な電子衝突全断面積の決定が可能となる。圧力変化測定の一例として、 H_2 分子を標的としたときの $I(E)$ の圧力依存性を Fig. 2 に示す。Fig. 2 から、20 eV から 0.3 eV の非常に広いエネルギー範囲に渡って圧力に対する $\ln I(E)$ の線形性が保たれること、また多数の測定点を用いることで正確に電子衝突全断面積を決定できることが分かる。なお、本測定法では 1 セットの測定に 8 時間程度を要し、その間の放射光の安定性が電子衝突全断面積の精度を決定する重要な要因となる。このため、本測定には PF リングの Top-up 運転が必須である。

本実験手法では、光イオン化セルと衝突セルの電位差により衝突エネルギーを決定するが、このうち光イオン化セルの電位は、浸み出し電場やイオンによる空間電荷効果、水素分子の吸蔵などに起因する接触電位差の存在により正確な値を求めるのが困難である。よって、別の方法で衝突エネルギーの較正を行う必要がある。しかしながら、水素分子の電子衝突全断面積上にはエネルギー較正の基準になるような、エネルギーが精度良く知られた構造は存在しなかった。一方、例えば Kr の電子衝突全断面積上には、エネルギーが精度良く知られている Feshbach 共鳴による構造が存在する [19]。そこで、本研究では、Kr と水素分子の混合気体を標的として測定を行った。混合気体に対する測定により、Kr の共鳴エネルギーを基準として、衝突エ

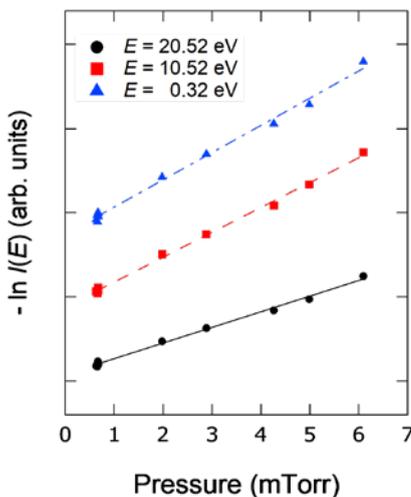


Figure 2 Logarithmic transmitted electron count plotted as a function of target gas pressure at the collision cell.

エネルギー 11 ~ 13 eV に存在する水素分子の Feshbach 共鳴による構造の共鳴エネルギーを高精度で決定した。これにより、水素分子の電子衝突全断面積の衝突エネルギーを、混合気体測定で求めた水素分子の Feshbach 共鳴の共鳴エネルギーを基準として較正することができた。このようにして決定したエネルギー較正值の誤差は、いずれの水素分子同位体でも 10 meV 以下である。

3. 電子 - 水素分子衝突の全断面積測定

Fig. 3 に $E \geq 0.2$ eV において我々が測定した電子 - H_2 衝突の電子衝突全断面積を示す。水素分子の電子衝突全断面積には、 $^3\Sigma_u^+$ 形状共鳴に由来するブロードなピークが $E \approx 3$ eV に現れることが知られている。電子衝突における共鳴とは、入射電子が標的分子に一時的に束縛されることで短寿命の負イオンを形成する現象であるが [20]、水素分子の $^3\Sigma_u^+$ 形状共鳴は負イオンの寿命が短い (~ 1 fs) ため電子衝突全断面積上にブロードなピークとなって現れる。Fig. 3 では H_2 分子に対する過去の実験結果も合わせて示したが [10-17]、 $E \geq 1$ eV における Ferch らの結果 [10] を除いて、過去の実験結果は、我々の測定結果と誤差の範囲内で一致している。

次に、 $E \geq 0.2$ eV における HD 、 D_2 の電子衝突全断面積の測定結果を、 H_2 の結果と併せて Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、 $^3\Sigma_u^+$ 形状共鳴のエネルギー領域において H_2 、 HD と D_2 の全断面積の間に有意な差が存在することが分かる。 H_2 、 HD 、 D_2 の全断面積をそれぞれ σ_{H_2} 、 σ_{HD} 、 σ_{D_2} とすると、形状共鳴エネルギー領域における全断面積の大小関係は、

$$\sigma_{H_2} \approx \sigma_{HD} > \sigma_{D_2}$$

となり、全断面積の差は $0.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ のオーダーである。水素分子同位体の電子衝突全断面積上に同位体効果を見出したのは、本研究が初である。電子励起のチャンネルが開く $E \geq 10$ eV のエネルギー領域においても、同様の傾向が引き続き存在している。

我々が測定した電子衝突全断面積は、弾性衝突過程のほ

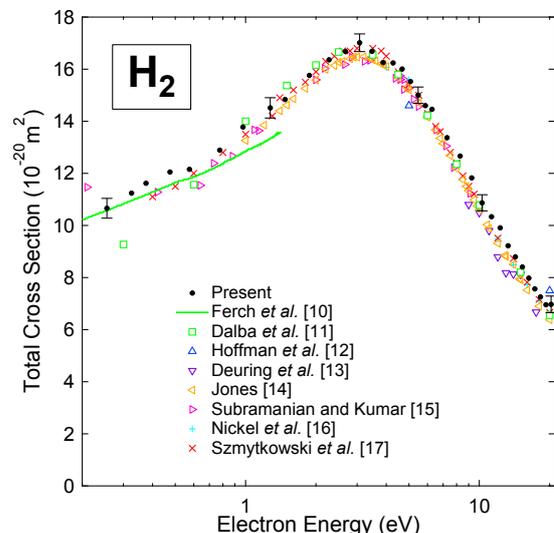


Figure 3 Total cross section for electron scattering from H_2 .

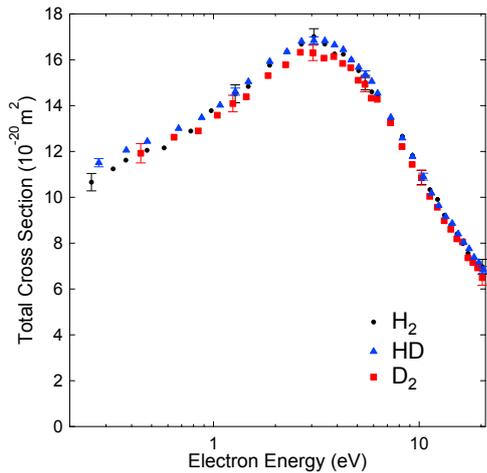


Figure 4 Total cross sections for electron scattering from H₂, HD, and D₂.

か、標的分子の励起を伴う非弾性衝突の寄与も含んでいる。入射電子と標的分子の間の相互作用ポテンシャルは同位体間でほとんど変化しないこと、このエネルギー領域ではいわゆる Fixed Nuclei (FN) 近似が大きくは破れないであろうことから [2], 弾性衝突断面には同位体効果はほとんど現れないと考えられる。したがって、形状共鳴エネルギー領域の全断面積への同位体効果の起源は、非弾性衝突過程、特に振動励起過程の断面積に由来すると考えられる ($E \approx 3$ eV では電子励起過程は起こらない)。水素分子の振動励起断面積 σ^{vib} では、 $^2\Sigma_u^+$ 形状共鳴のエネルギー領域において、質量に関するスケール則の存在が議論されており [21,22], それによると

$$\sigma_{\text{H}_2}^{\text{vib}} > \sigma_{\text{HD}}^{\text{vib}} > \sigma_{\text{D}_2}^{\text{vib}}$$

が成立する。 $E \approx 3$ eV における振動励起断面積の大きさは $0.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ のオーダーであるが [23], これは H₂ と D₂ の全断面積絶対値の差と同程度であり, H₂, D₂ 間の同位体効果の起源は振動励起断面積である。一方, 振動励起断面積への同位体効果だけでは, HD の全断面積が H₂ の全断面積と同程度である理由を説明できないが, これは回転励起断面積の寄与を考えることで説明できる。回転励起について, H₂, D₂ では分子の空間反転対称性により回転量子数の変化 $\Delta J = \text{even}$ の励起のみ許容であるが, HD では空間反転対称性の破れから $\Delta J = \text{odd}$ の励起も許容となる [24]。HD の $\Delta J = \text{odd}$ の回転励起断面積は未だ測定されていないが, Hara の理論計算 [25] によると $0.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 程度であり, 本研究で得られた同位体効果による全断面積の差のオーダーと一致する。よって, 形状共鳴エネルギー領域における全断面積への同位体効果は, 振動励起断面積への同位体効果と HD の $\Delta J = \text{odd}$ の回転励起断面積の寄与により定性的に説明することが可能である。なお, Fig. 4 によると $E \approx 3$ eV での σ_{H_2} と σ_{D_2} の断面積差はおおよそ $0.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ であり, 振動・回転励起断面積から想定される同位体効果よりも少し大きい。形状共鳴エネルギー領域の断面積差には, 未知の同位体効果が寄与している可能性もある。

本研究では, $E \lesssim 0.2$ eV での超低エネルギー領域につい

ても電子衝突全断面積の測定を行った。特に, 80 meV を下回るエネルギー領域において, H₂, HD, D₂ の電子衝突全断面積の間には同位体効果が存在し,

$$\sigma_{\text{H}_2} \approx \sigma_{\text{D}_2} < \sigma_{\text{HD}}$$

となる結果を得ている。衝突エネルギーが小さくなると同位体効果による全断面積絶対値の差は大きくなり, $E \approx 10$ meV において全断面積の差は $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ にも達する。20 meV 以上のエネルギー領域では過去に Ferch らも全断面積測定を行っている [10] が, 当時の実験精度ではこの同位体効果は確認できなかった。この同位体効果は, 放射光による安定な電子源を利用して初めて見出すことができたものである。

上でも述べたように, 電子衝突全断面積に対する同位体効果に寄与するのは非弾性衝突過程であると考えられる。しかしながら, 超低エネルギー領域では非弾性衝突過程の寄与は小さくなる。Table 1 に H₂, HD, D₂ の振動・回転励起のしきいエネルギーを示す。Table 1 から分かるように, $E \lesssim 80$ meV において全断面積へ寄与するのは, 弾性衝突過程と回転励起過程のみである。しかしながら, 水素分子の回転励起断面積は衝突エネルギーが下がるに従い小さくなると考えられ [22-24], 実験で得られた超低エネルギー領域の同位体効果と一致しない。これは, 超低エネルギー領域の弾性衝突過程に何らかの同位体効果が存在することを示している。

1つの可能性として, 始状態の回転分布が同位体効果に与える影響がある。H₂, HD, D₂ は原子核の統計性の違いから始状態の回転分布が異なることが知られている。これまで, 弾性衝突断面積の始状態の回転量子数依存性はほとんどないと考えられてきたが, もし回転量子数依存性が存在すれば, 始状態の回転分布の違いが断面積に反映されるはずである。本研究では室温 (300 K) の水素分子に対して全断面積の測定を行ったが, 上記仮説が正しければ, 標的分子の温度を変えることで全断面積に何らかの影響があるかもしれない。もう1つの可能性としては, 分子の運動が弾性衝突過程の断面積に与える影響がある。はじめにも述べたように, 超低エネルギー電子による衝突では衝突時間が分子運動の時間スケールに近づくので, 電子が分子と衝突しているさなかの分子振動・回転が散乱電子に影響を与え得る。もしこのような“動的な”効果が存在するのであれば, 弾性衝突断面積は分子振動・回転運動を反映し, その結果, 何らかの形で質量依存性を持つはずである。すなわち, ここで見出された同位体効果は, 従来の理論モデルの限界を露呈するものであり, 少数多体問題の動的な取

Table 1 Threshold energies for vibrational and rotational excitations of hydrogen molecules.

		Threshold Energy (meV)		
		H ₂	HD	D ₂
Vibrational Excitation		287.85	191.31	157.73
Rotational	$J_i = 0 \rightarrow J_f = 2$	45.24	33.96	22.62
Excitation	$J_i = 0 \rightarrow J_f = 1$	—	11.32	—

り扱いまで踏み込んだ、より先進的な理論の必要性を示唆するものである。

4. まとめ

本稿では、本研究グループが現在取り組んでいる水素分子同位体の超低エネルギー電子衝突実験について紹介した。水素分子は最も簡単な分子であるが、超低エネルギーにおける電子衝突全断面積には未知の同位体効果が存在することが本研究により明らかになった。この同位体効果は、実験精度の問題から過去の研究では見落とされており、放射光を利用した高精度の電子衝突全断面積測定を行うことで初めて見出されたものである。超低エネルギーにおける同位体効果の起源の解明のためには、標的分子温度依存性の測定などの発展的な実験に加え、理論面からの更なるアプローチが必要である。また、散乱電子の角度分布は衝突過程のダイナミクスを強く反映するので、角度微分断面積の測定がこの同位体効果に関する新たな知見を提供することが期待される。超低エネルギー電子衝突実験の更なる進展のためにも、角度微分断面積測定の実現が強く望まれる。

引用文献

- [1] Y. Hatano, Y. Katsumura, and A. Mozumder, eds., 'Charged Particle and Photon Interactions with Matter', (CRC Press, Boca Raton, 2011).
- [2] N. F. Lane, Rev. Mod. Phys. **52**, 29 (1980).
- [3] 黒川学, 北島昌史, 小田切丈, 加藤英俊, 星野正光, 田中大, 伊藤健二, PF News **28** (3), 25 (2010).
- [4] M. Kurokawa, M. Kitajima, K. Toyoshima, T. Odagiri, H. Kato, H. Kawahara, M. Hoshino, H. Tanaka, and K. Ito, Phys. Rev. A **82**, 062707 (2010).
- [5] M. Kurokawa, M. Kitajima, K. Toyoshima, T. Kishino, T. Odagiri, H. Kato, M. Hoshino, H. Tanaka, and K. Ito, Phys. Rev. A **84**, 062717 (2011).
- [6] K. Shigemura, M. Kitajima, M. Kurokawa, K. Toyoshima, T. Odagiri, A. Suga, H. Kato, M. Hoshino, H. Tanaka, and K. Ito, Phys. Rev. A **89**, 022709 (2014).
- [7] 重村圭亮, 北島昌史, 小田切丈, 加藤英俊, 星野正光, 田中大, 伊藤健二, PF News **32** (2), 20 (2014).
- [8] M. Kitajima, T. Kishino, T. Okumura, N. Kobayashi, A. Sayama, Y. Mori, K. Hosaka, T. Odagiri, M. Hoshino, and H. Tanaka, Eur. Phys. J. D **139**, 71 (2017).
- [9] D. E. Golden, H. W. Bandel, and J. A. Salerno, Phys. Rev. **146**, 40 (1966).
- [10] J. Ferch, W. Raith, and K. Schröder, J. Phys. B **13**, 1481 (1980).
- [11] G. Dalba, P. Fornasini, I. Lazzizzera, G. Ranieri, and A. Zecca, J. Phys. B **13**, 2839 (1980).
- [12] K. R. Hoffman, M. S. Dababneh, Y. -F. Hsieh, W. E. Kauppila, V. Pol, J. H. Smart, and T. S. Stein, Phys. Rev. A **25**, 1393 (1982).
- [13] A. Deuring, K. Floeder, D. Fromme, W. Raith, A. Schwab,

G. Sinapius, P. W. Zitzewitz, and J. Krug, J. Phys. B **16**, 1633 (1983).

- [14] R. K. Jones, Phys. Rev. A **31**, 2898 (1985).
- [15] K. P. Subramanian and V. Kumar, J. Phys. B **22**, 2387 (1989).
- [16] J. C. Nickel, I. Kanik, S. Trajmar, and K. Imre, J. Phys. B **25**, 2427 (1992).
- [17] C. Szymtkowski and K. Maciąg, Phys. Scr. **54**, 271 (1996).
- [18] S. Cvejanović and F. H. Read, J. Phys. B **7**, 1180 (1974).
- [19] T. H. Hoffmann, M. -W. Ruf, H. Hotop, O. Zatsarinny, K. Bartschat, and M. Allan, J. Phys. B **43**, 085206 (2010).
- [20] 田中大, 上田潔, 井口道生, 分光研究, **45**, 267 (1996).
- [21] E. S. Chang and S. -F. Wong, Phys. Rev. Lett. **38**, 1327 (1977).
- [22] D. E. Atems and J. M. Wadehra, Chem. Phys. Lett. **197**, 525 (1992).
- [23] J. -S. Yoon, M. -Y. Song, J. -M. Han, S. H. Hwang, W. -S. Chang, B. J. Lee, and Y. Itikawa, J Phys. Chem. Ref. Data **37**, 913 (2008).
- [24] K. Takayanagi, J. Phys. Soc. Japan **28**, 1527 (1970).
- [25] S. Hara, J. Phys. Soc. Japan **30**, 819 (1971).

(原稿受付日: 2018年6月22日)

著者紹介

奥村拓馬 Takuma OKUMURA



東京工業大学大学院 理工学研究科 化学専攻
河内・北島研究室 博士課程3年
〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1
TEL & FAX: 03-5734-2725
e-mail: okumura.ta@m.titech.ac.jp

最近の研究: 低エネルギー配向分子 - 電子衝突に関する研究, 放射光を用いた超低エネルギー電子 - 原子・分子衝突ダイナミクスの研究。

江尻智一 Tomakazu EJIRI



東京工業大学 理学院化学系化学コース
河内・北島研究室 修士課程2年
〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1
TEL & FAX: 03-5734-2725
e-mail: ejiri.ta@m.titech.ac.jp

最近の研究: 電子 - イオン同時計数法による低エネルギー電子 - 配向分子衝突の研究, 放射光を用いた超低エネルギー電子 - 分子衝突の研究。

穂坂綱一 Kouichi HOSAKA

東京工業大学 理学院 助教
〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1
TEL & FAX: 03-5734-2725

e-mail: hosakak@chem.titech.ac.jp

略歴：2005年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了，
2010年東京工業大学助教。理学博士。

最近の研究：分子の光解離で生成する原子ペアのもつれに
関する研究，分子多電子励起状態の研究。

北島昌史 Masashi KITAJIMA

東京工業大学 理学院 准教授

〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1

TEL: 03-5734-3812

FAX: 03-5734-2725

e-mail: mkitajim@chem.titech.ac.jp

略歴：1996年東京工業大学理工学研究科化学専攻博士課程
修了，1996年理化学研究所基礎科学特別研究員，1998
年上智大学理工学部助手，2005年東京工業大学理工学研
究科准教授。博士（理学）。

最近の研究：放射光および電子線を用いた原子・分子衝突
実験。

小田切丈 Takeshi ODAGIRI

上智大学理工学部 准教授

〒102-8554 千代田区紀尾井町 7-1

e-mail: odagiri.t@sophia.ac.jp

略歴：1996年東京工業大学理工学研究科化学専攻博士課程
中退，1996年東京工業大学理学部化学科助手，2012年
上智大学理工学部准教授。博士（理学）。

最近の研究：多電子励起分子ダイナミックス，多重電離ダ
イナミックス。

星野正光 Masamitsu HOSHINO

上智大学理工学部 准教授

〒102-8554 千代田区紀尾井町 7-1

e-mail: masami-h@sophia.ac.jp

略歴：2004年上智大学大学院理工学研究科物理学専攻博
士後期課程修了，2004年理化学研究所基礎科学特別研究
員，2005年上智大学理工学部助手，2010年同学部准教授。
博士（理学）。

最近の研究：気相原子分子の低エネルギー電子分光，加熱
分子の光電子分光。