

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22550002

研究課題名（和文） 解離イオン同時計測電子エネルギー損失分光による空電子軌道イメージング

研究課題名（英文） Unoccupied molecular orbital imaging by electron-ion coincidence spectroscopy

研究代表者

渡邊 昇（WATANABE NOBORU）

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：90312660

研究成果の概要（和文）：空電子軌道の実験的観測に向けた基盤技術の確立を目的とし、電子衝突時における標的分子の配向方向を規定して電子散乱断面積を測定する“配向分子の電子エネルギー損失分光法”の開発を行った。非弾性散乱電子と解離イオンとを同時計測する新規装置を製作することで、分子の配向方向に依存した電子散乱断面積の変化をとらえることに成功した。さらに、電子散乱実験から振電相互作用効果を視覚的に捉える手法を考案し、幾つかの分子の価電子励起に適用した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method to observe differential electron scattering cross sections in molecular frame to provide a firm basis for unoccupied molecular orbital imaging. Coincidence detection of inelastically scattered electrons and fragment ions has made it possible to observe the angular dependence of the electron scattering cross section for a fixed in space molecule. Furthermore, vibronic effects on electronic excitations in molecules have been investigated using a newly developed method based on electron energy loss spectroscopy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：電子エネルギー損失分光，一般化振動子強度，電子励起状態

1. 研究開始当初の背景

分子軌道は、今や自然科学の広範な分野において基礎的概念となっている。その最大の理由は、フロンティア軌道理論が端的に示すように、反応性など分子の性質の多くが HOMO（最高被占有軌道）や LUMO（最低空軌道）といった個々の分子軌道の形によって決まることであろう。こうした分子軌道の実験的観測は古くから試みられてきており、中

でも電子線コンプトン散乱実験の発展形である電子運動量分光（EMS）は、約40年もの歴史を持つ。最近では、走査型トンネル顕微鏡（STM）を用いた表面吸着分子の HOMO の観測 [J.I. Pascual et al., *Chem. Phys. Lett.* **321**, 78 (2000)] や、強光子場中で発生する高次高調波の測定から HOMO を再構築する“分子軌道トモグラフィー” [J. Itatani et al., *Nature* **432**, 867 (2004)] 等の手法も提案されてきており、分子軌道の形を正確に知ることは、現

在においても依然自然科学の中心的課題となつてゐる。しかしながら、従来の実験が対象としてきたのは主として被占有軌道であり、HOMO と等しく分子の性質を支配する LUMO などの空軌道について定量的な観測を実現するためには、更なる飛躍的展開を必要とする。

このような状況のもと、研究代表者は一貫して高速電子線やX線の散乱実験と独自の理論的手法とを組み合わせた原子・分子の電子状態研究を展開してきた。特に、2001年以降は個々の電子軌道を実験的に観測できるEMSの発展性に興味を持ち、本分光を用いた研究を進めてきている。中でも、従来のEMS研究の枠組みを超えた新たな研究への展開に深い関心を抱き、これまでに“サテライト遷移の観測による電子相関の研究”や“電子線コンプトン散乱における二電子励起メカニズムの解明”などの成果を得ている[N. Watanabe et al, *Phys. Rev. A* **75**, 052701 (2007)]など。さらに電子衝突時における標的分子の配向方向を規定してEMS断面積を測定するプロジェクトにおいても中心的な役割を果たし、“配向分子のEMS実験”を世界に先駆けて実現した[M. Takahashi, N. Watanabe et al, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 213202 (2005)]。(e,2e+M)分光と名付けた本手法の開発により、標的気相分子のランダムな配向により空間平均した形でしか分子軌道を観測できないというEMS最大の実験的困難を克服し、被占有分子軌道の3次元観測法の確立に向けた貴重な一歩を踏み出すことができたのである。

こうしたEMS研究を展開する一方で、分子の有する性質の理解には被占有軌道だけでなく空軌道についても詳細な知見が必須であるという認識の下、空軌道の実験的観測の可能性についても議論を積み重ねてきた。その結果、電子線非弾性散乱実験である電子エネルギー損失分光(EELS)を基礎に置く実験手法を新たに開発することで、空軌道のイメージングが実現できるとの見通しを持ち、本研究課題への着手に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、分子軌道の中でも特にLUMOなどの空軌道に着目し、電子非弾性散乱に基づくアプローチから軌道の形を実験的に観測するための基盤技術を確立することにある。電子衝突時における標的分子の配向方向を規定して電子散乱断面積を測定する“配向分子の電子エネルギー損失分光法”を新たに開発し、電子励起状態の波動関数形をプローブすることで、空軌道の形という観点から化学反応や分子認識、電磁波や荷電粒子との相互作用に伴う電子励起過程などの詳細な理解を目指した研究を展開する。

3. 研究の方法

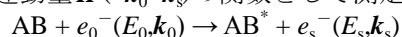
散乱理論によれば、高速電子の衝突により被占有軌道 φ_i から空軌道 φ_f へと電子が励起する過程の遷移行列要素 $M_{fi}(\mathbf{K})$ は、近似的に励起に關与する軌道の積 $\varphi_i^* \varphi_f$ のフーリエ変換で与えられる。

$$M_{fi}(\mathbf{K}) = \langle \varphi_f(\mathbf{r}) | \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) | \varphi_i(\mathbf{r}) \rangle$$

\mathbf{K} は標的分子が入射電子から受け取る運動量(移行運動量)を示す。ここで、散乱前後のエネルギー変化から任意の軌道間の電子遷移を選択し、それに対するEELS断面積をベクトル \mathbf{K} の関数として三次元的に観測すれば、測定結果より軌道の積 $\varphi_i^* \varphi_f$ を運動量空間で再構築することができる。さらにEMS研究などで蓄積されてきた被占有軌道のデータと組み合わせることで、空軌道そのものを求めることも可能となるだろう。

上記の発想に基づき空軌道のイメージングを行うためには、通常のEELS法をさらに発展させた実験手法の開発が必要となる。なぜなら、従来の実験ではランダムに空間配向した気相分子を標的としているため、得られる測定結果は分子の方向に対して空間平均されており、EELS断面積に本来含まれる異方的な分子軌道の形に関する情報が失われてしまうためである。

通常のEELS実験では、電子線を標的分子(AB)に照射し、非弾性散乱された電子の強度分布を散乱前後のエネルギー変化である損失エネルギー $E (=E_0 - E_s)$ と運動量変化である移行運動量 $\mathbf{K} (= \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s)$ の関数として測定する。



損失エネルギーから特定の軌道間の励起を選択し、それに対する遷移強度を移行運動量の大きさ $K (=|\mathbf{K}|)$ の関数として測定できる。ここでスカラー量 K を用いるのは、標的気相分子のランダムな空間配向によって、測定から得られる散乱断面積が空間平均されたものになってしまうためである。

通常の電子エネルギー損失分光が持つ“空間平均”の実験的困難を克服するため、電子衝突により生成した励起分子 AB^* の後続解離過程で生じるフラグメントイオン A^+ に着目する。 AB^* が分子回転より十分速やかに解離を起こせば、 A^+ の反跳方向は電子衝突時における分子軸方向と一致する。このaxial recoil近似を利用して、解離イオンと散乱電子を同時に計測することで、分子配向を規定してEELS断面積を測定することができる。

本研究では、画像観測型イオン分析器を新たに製作し、既存の角度分解型EELS装置に組み込むことで、非弾性散乱電子と解離イオンとの同時計測システムを構築する。本装置に基づき、EELS断面積を分子座標系におい

て3次元観測するための基盤技術の確立を目指した。こうした新規手法の開発に加え、電子励起状態に応じて EELS 断面積が特徴的な K 依存性を示す性質を利用することで、分子振動を介した電子状態間のカップリングを視覚的に捉える手法を考案し、電子励起における振電相互作用効果の研究を行った。

4. 研究成果

(1) 解離イオン同時計測 EELS 装置の開発

本研究で製作した実験装置の模式図を図1に示す。電子銃で生成した高速電子線を散乱点で試料ガスと交差させ、角度 θ 方向に非弾性散乱された電子を半球型電子分析器でエネルギー分析した後、位置敏感型検出器で計測する。半球型電子分析器と位置敏感型検出器を組み合わせたエネルギー分散型電子分析器の導入により、一定のエネルギー範囲に亘って散乱電子を一挙に計測することができ、既存の装置に比べ約一桁の検出効率の向上を達成した。励起分子の後続解離過程によって生じる解離イオンは、散乱点上方に設置した画像観測型イオン分析器を用いて計測する。散乱点より放出された解離イオンは、分析器内に入射すると平行電場によって散乱面に対し垂直方向へ加速される。加速されたイオンは飛行管を通過した後、二次元検出器に到達する。イオンの飛行時間と二次元検出器上での到達位置から、その初期運動量を決定でき、電子衝突時における分子軸の方向がわかる。半球型電子分析器と画像観測型イオン分析器は、研究所附属機械工場の技術職員との連携のもと、新たに製作した。

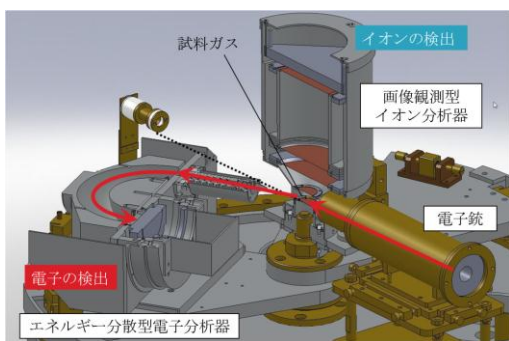


図1：解離イオン同時計測 EELS 装置

これら分析器を組みあわせ、散乱電子と解離イオンとの同時計測実験を行った。こうした実験から得られる測定結果には、同じ事象で生成した二粒子を観測する真の同時計測信号だけでなく、異なる事象で生成した電子とイオンとが偶然近い時間間隔で検出される偶発信号も含まれる。同時計測実験では、同じ事象で生成したペアを正確に対応づけ、偶発信号の割合を減らすことがその成功の

鍵となる。そこで、 N_2 の内殻励起を対象とした実験を行うことにより、最適な測定条件を模索した。内殻励起分子は、オージェ過程を経由して分子の回転周期よりはるかに短時間で、ほぼ 100%イオン解離するため、本実験のテストに絶好である。

測定では、従来の EELS 実験で用いていた連続電子ビームに代え、電子パルス列を入射電子として用いた。エネルギー1.5 keV のパルス電子を窒素ガスに照射し、 $\theta = 6^\circ$ 方向に非弾性散乱された電子を検出している。散乱電子は電子パルス発生からおおよそ 200 ns 後に検出され、次に電子よりもはるかに重い解離イオンが 5 μ s 近辺で検出器に到達する。その後、散乱点下部に設置した電極に電圧を印加し、散乱点近傍に残存する親イオンなどの測定対象以外の荷電粒子を全て排除した。この手順を1セットとして、全てのイオンを検出し終えた後、次の電子パルスを照射するという操作を繰り返す。本手順で検出された電子とイオンは同じ電子パルスで生成したものに限定されるため、連続電子ビームを用いた場合に比べ、偶発信号の割合を格段に減少できる。

同時計測実験より得られた解離イオンの飛行時間 (TOF) スペクトルを図2に示す。

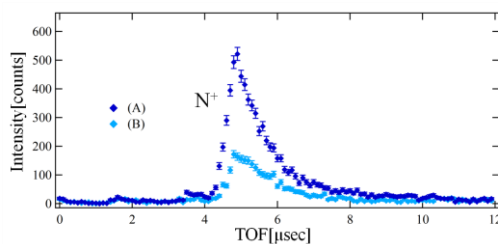


図2：解離イオンの飛行時間スペクトル (A)散乱電子と同期したイオン信号と (B)偶発信号の寄与。

電子パルス発生を基準としたイオンの検出時刻を横軸にとり、その検出数をプロットした。イオンと同時計測した散乱電子のエネルギーより、 $N\ 1s$ 内殻軌道から π^* 軌道に電子励起した事象のみを選別している。5 μ s 付近のピークが N^+ 解離イオンの検出によるものである。図には、異なる電子パルスから生成した散乱電子と解離イオンとを計測した事象から見積もった偶発信号の寄与も併せて示している。一つの電子パルスによって生成された電子とイオンを検出した事象から構成した TOF スペクトルは、偶発事象から構成した結果よりも大きな強度を示している。このことは、本測定により真の信号を観測することができた確かな証左である。偶発信号の寄与を差し引くことで、 N_2 内殻励起から生成した非弾性散乱電子と解離イオンとの真の同時計測信号を得ることができる。

得られた結果を用いて、予備的な解析を試

みた。本解析では、 N^+ イオンの飛行時間と二次元検出器上での到達位置から、その初期運動量ベクトルを求め、電子衝突時における標的分子の分子軸方向を特定する。ここでは、散乱面に対する垂直軸から 60° 傾いた N_2 分子に電子が衝突した事象を選別し、方位角 ϕ に対するEELS断面積の角度依存性(図3(a)を参照)を求めた結果を図3(b)に示す。分子軸方向の散乱面への射影が、移行運動量ベクトルと平行になる場合を角度の基準($\phi = 0^\circ$)とした。明確な角度依存性が現れていることがわかる。本結果は、電子衝突時における分子の配向方向に依存した電子散乱断面積を観測したことに相当する。

内殻電子の空間的広がりが小さいことから、 K がそれほど大きくない本実験条件では双極子近似($\exp[i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}] \sim 1 + i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}$)が良く成り立つと考えられる。そこで、双極子遷移が支配的であるとの仮定に基づき、EELS断面積の ϕ 依存性を求め、実験値と比較することで測定結果の妥当性を検証した。理論値を図3(b)に実線として示す。理論値は、分布形状を良く再現していることがわかる。以上の結果から、本研究で開発した実験装置により、分子の配向方向を規定したEELS断面積を初めて観測できたものと結論した。

さらに、様々な散乱角で同様の測定を繰り返せば、分子座標系においてEELS断面積の K 依存性を3次的に測定することができる。本研究で開発した実験装置には、未だ多くの改良の余地が残されているが、以上の結果はEELS実験による空軌道イメージングの実現へ向けた大きな一歩といえるだろう。本結果を論文としてまとめるべく、現在、実験結果の定量的な解析を進めている。

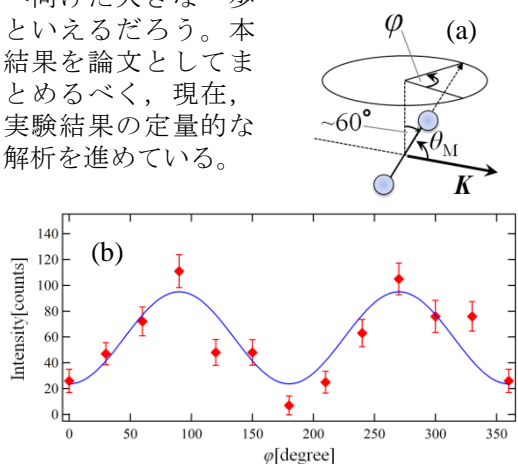


図3 : EELS断面積の分子配向依存性
(a) 分子軸方向と K ベクトルとの関係と (b) $N 1s \rightarrow \pi^*$ 遷移断面積の ϕ 依存性。

(2) EELSを用いた振電相互作用効果の研究
分子振動と電子運動の相関、すなわち振電相互作用が、分子の電子励起過程にしばしば顕著な影響を与えることが知られている。光学スペクトルに現れる禁制線の存在が、その端的な例といえよう。禁制線の出現は、分子

振動にともなう電子波動関数の歪みにより選択則が破れた結果である。こうした振電相互作用効果は、スペクトルの解釈などの分光学的興味に加え、その影響が分子の振動状態に強く依存することから、プラズマ中や上層大気中といった、分子の多くが振動励起した高温環境下における化学反応を理解するための鍵となっている。

有名な Herzberg-Teller 展開によれば、振電相互作用の本質は分子振動を介した電子状態間のカップリングとして理解される。核変位によって生じるポテンシャルの変化が相互作用として働き、異なる電子状態を結びつけるわけだ。電子励起過程において、混入した電子状態への遷移から強度を貰い受ける、いわゆる intensity borrowing としてその寄与が遷移強度へ現れることから、分子振動を介した電子状態間のカップリングを実験的にプローブできれば、振電相互作用効果に関して詳細な議論を展開することが可能になるだろう。

本研究において我々は、電子散乱実験における入射電子から標的分子への運動量移行 K を新たなパラメータとして振電相互作用研究に導入することで、電子状態間のカップリングを視覚的に捉えることが可能になるとの着想を得た。EELSによれば、個々の電子遷移に対する電子散乱断面積を移行運動量の関数として観測できる。EELS断面積は標的始状態から終状態への遷移行列要素を含む一般化振動子強度(GOS)に比例するが、この量は標的分子の電子励起状態に応じて特徴的な K 依存性を示すため、その分布形状を調べることで電子状態間のカップリングを論じることができるのである。例えば、ある励起状態Aに別の状態Bがカップルした場合、GOSの K 依存性は、これら状態への遷移に対する分布の重ね合わせとして近似的に与えられるだろう。こうした着想に基づき、幾つかの分子の価電子励起における振電相互作用効果を調べた。ここでは、 CF_4 に対する結果[雑誌論文#5,9]を示す。

$E = 12.6 \text{ eV}$ に現れる CF_4 の $1t_1 \rightarrow 3s$ 遷移について、GOS分布の実験値と理論計算との比較を図4に示す。理論的なGOS分布の計算には、電子相関を高度に取り込んだEOM-CCSDレベルの波動関数を用いた。運動量移行の大きさがゼロとなる極限において、GOSは光吸収断面積に比例する光学的振動子強度に収束することが知られており、一般に運動量原点($K=0$)で最大値をとる分布が観測された場合、その遷移は双極子許容であると解釈される。ところが、本遷移は双極子禁制であるにもかかわらず、許容遷移に特有の分布形状が観測された。分子の対称性に基づく考察によれば、禁制遷移のGOSは運動量原点で強度を持ち得ない。実際、平衡核配

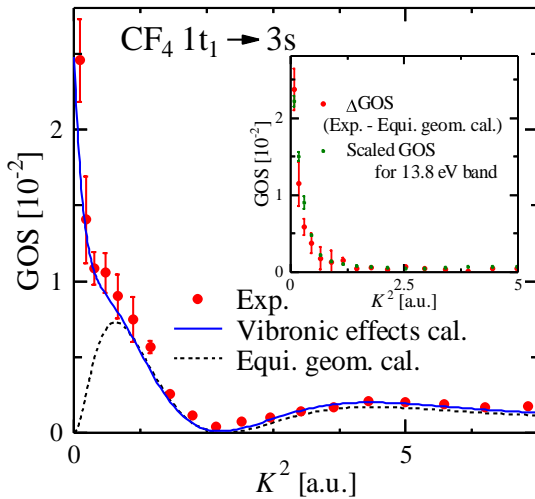


図4 : CF₄ 1t₁ → 3s 遷移の GOS 分布

置を仮定して行った理論計算の結果 (図中点線) は期待通りの分布を示しており, 低移行運動量領域において実験と理論の間に顕著な相違が現れている。この理論計算からの乖離こそが, 振電相互作用によって混入した他の電子状態の寄与であると考えられる。そこで, 実験と理論計算との差を取ることでその寄与を抜き出し, 分布形状から混入した電子状態の特定を試みた (図4挿入図)。得られた結果は本遷移に隣接した 13.8 eV の ¹T₂ 遷移に対する GOS 分布と形状がよく一致しており, 分子振動を介して ¹T₂ 状態がカップルしたことを明確に示している。

より定量的に議論するため, 分子振動の影響を考慮した理論計算を行った。我々は, (1) 分子振動を調和振動子として扱えること, および (2) 電子遷移行行列が原子核の変位に応じてあまり急激には変化しないこと, という二つの条件を仮定した場合, 分子振動を考慮した GOS が近似的に次式で表せることを示した [雑誌論文#5]。

$$f(K) = \frac{2E}{K^2} [M_{f_0}(K, \theta) + \sum_L \langle \xi_{vL} | M_{f_0}(K, Q_L \hat{q}_L) - M_{f_0}(K, \theta) | \xi_{vL} \rangle],$$

$$M_{f_0} = \frac{1}{4\pi} \int \left| \langle \Psi_f(\mathbf{r}; \mathbf{Q}) | \sum_j \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_j) | \Psi_0(\mathbf{r}; \mathbf{Q}) \rangle \right|^2 d\Omega_K$$

ここで, Q_L は基準振動の座標, ξ_{vL} は対応する振動の波動関数を表す。本式の第一項は平衡核間配置における分子の GOS に対応しており, 第二項が分子振動の寄与である。

得られた計算結果を実線で示す。低移行運動量領域の強度が大幅に増加し, 実験を完全に再現している。我々の用いた手法により, GOS に対する分子振動の寄与を定量的に評価できることがわかった。ここで, CF₄ がもつ4つの基準振動について考えてみよう。用

いた計算法によれば, 分子振動の影響は個々の基準振動の寄与の和として与えられるため, それらを個別に評価できる。個々の振動モードの関与を調べた結果, 本遷移において非対称伸縮振動の影響が支配的であることが明らかとなった。以上の結果は, 分子の対称性に関する以下の考察により理解できる。

本遷移に隣接する 13.8eV の励起バンドは 4t₂ → 3s および 1t₁ → 3p の双極子許容遷移に帰属されており, その電子終状態は ¹T₂ 状態である。一方, 今考えている 1t₁ → 3s 遷移の励起終状態は ¹T₁ であるが, 非対称伸縮振動によって分子の対称性が T_d から C_{2v} へと低下することで, 三重に縮退していた ¹T₂ と ¹T₁ 状態は, それぞれ ¹A₁, ¹B₁, ¹B₂ 状態と ¹A₂, ¹B₁, ¹B₂ 状態に分裂する。その結果, ¹B₁ と ¹B₂ 成分がどちらも相互作用可能となり, 4t₂ → 3s および 1t₁ → 3p 遷移からの intensity borrowing が起こったものと考えられる。

同様の機構に基づく禁制遷移の強度増大は, CF₄ に限らず正四面体型分子一般に起こり得る。実際, 正四面体構造を有する SiF₄ の HOMO-LUMO 遷移においても, 双極子禁制でありながら許容遷移に特有の GOS 分布を示すことが報告されているが, これも非対称伸縮振動を介した intensity borrowing に由来していると考えられる。本研究で用いた手法は, 様々な分子の価電子励起において振電相互作用効果が果たす役割の解明に大きく貢献できる。以上の成果は, 国際会議の招待講演としても採択された [学会発表 #1, 7]。

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 10 件)

- ① D. B. Jones, M. Yamazaki, N. Watanabe, M. Takahashi, Molecular-frame (e,2e) experiment for N₂ at large momentum transfer, *Physical Review A*, 査読有, 87 巻, 2013 年, 022714-1-5, DOI: 10.1103/PhysRevA.87.022714
- ② D. B. Jones, M. Yamazaki, N. Watanabe, M. Takahashi, Electron-impact ionization of N₂ at large momentum transfer above the double-ionization threshold, *Physical Review A*, 査読有, 86 巻, 2012 年, 062707-1-7, DOI: 10.1103/PhysRevA.86.062707
- ③ N. Watanabe, M. Yamazaki, M. Takahashi, Vibrational effects on valence electron momentum distributions of ethylene, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 137 巻, 2012 年, 114301-1-8, DOI: 10.1063/1.4752653
- ④ N. Watanabe, X. J. Chen, M. Takahashi,

- Interference Effects on (e, 2e) Electron Momentum Profiles of CF₄, *Physical Review Letters*, 査読有, 108 巻, 2012 年, 173201-1-5, DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.173201
- ⑤ N. Watanabe, D. Suzuki, M. Takahashi, Vibronic effects on the $1t_1 \rightarrow 3s$ Rydberg excitation in CF₄ induced by electron impact, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 134 巻, 2011 年, 234309-1-7, DOI: 10.1063/1.3601873
- ⑥ M. Yamazaki, H. Satoh, M. Ueda, D. B. Jones, Y. Asano, N. Watanabe, A. Czasch, O. Jagutzki, M. Takahashi, A highly sensitive electron momentum spectrometer incorporating a multiparticle imaging detector, *Measurement Science and Technology*, 査読有, 22 巻, 2011 年, 075602-1-13, DOI: 10.1088/0957-0233/22/7/075602
- ⑦ N. Watanabe, M. Takahashi, Carbon 1s electron momentum spectroscopy of CF₄, 査読有, 44 巻, 2011 年, 105201-1-6, DOI: 10.1088/0953-4075/44/10/105201
- ⑧ 山崎優一, 渡邊昇, 高橋正彦, 物質内電子運動の可視化法の開発と反応性・機能性の起源の解明, *マテリアルインテグレーション*, 査読無, 24 巻, 2011 年, 123-127
- ⑨ N. Watanabe, D. Suzuki, M. Takahashi, Experimental and theoretical study on generalized oscillator strengths of the valence-shell electronic excitations in CF₄, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 134 巻, 2011 年, 064307-1-12, DOI: 10.1063/1.3549135
- ⑩ D. B. Jones, M. Yamazaki, N. Watanabe, M. Takahashi, Electron-impact ionization of the water molecule at large momentum transfer above the double-ionization threshold, *Physical Review A*, 査読有, 83 巻, 2011 年, 012704-1-8, DOI: 10.1103/PhysRevA.83.012704
- [学会発表] (計 38 件)
- ① N. Watanabe, T. Hirayama, D. Suzuki, M. Takahashi, Angle-Resolved EELS Study of Vibronic Effects on Valence-Shell Electronic Excitations in Molecules, *10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics* (招待講演), 2012 年 10 月 27 日, 台北, 台湾
- ② 渡邊昇, 山崎優一, 高橋正彦, エチレンの電子運動量分布に対する分子振動の影響, *第 6 回分子科学討論会*, 2012 年 9 月 18 日, 東京
- ③ N. Watanabe, T. Hirayama, D. Suzuki, M. Takahashi, Vibronic effects on the valence-shell electronic excitations in CF₄ and CO₂ induced by electron impact, *28th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics*, 2012 年 6 月 8 日, 福岡
- ④ 渡邊昇, 片渕啓介, Xiangjun Chen, 高橋正彦, 高速電子衝撃イオン化における多中心干渉効果: CF₄ と CCl₄ の電子運動量分布, *日本物理学会第 67 回年次大会*, 2011 年 3 月 24 日, 西宮
- ⑤ 渡邊昇, 平山司, 鈴木大介, 高橋正彦, 角度分解型 EELS を用いた CO₂ の価電子励起の研究, *日本物理学会 2011 年秋季大会*, 2011 年 9 月 21 日, 富山
- ⑥ 渡邊昇, 山崎優一, 高橋正彦, 高速電子衝撃実験で探る分子の電子状態, *化学系学協会東北大会 物理化学コロキウム* (招待講演), 2011 年 9 月 17 日, 仙台
- ⑦ N. Watanabe, Angle-resolved electron energy loss spectroscopy study on the valence-shell electronic excitations of molecules, *14th Asian Chemical Congress 2011* (招待講演), 2011 年 9 月 6 日, バンコク, タイ
- ⑧ N. Watanabe, M. Takahashi, Binary (e,2e) study of multi-center interference effects on electron momentum densities of CF₄ and CCl₄, *International Symposium on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics* (招待講演), 2011 年 8 月 5 日, ダブリン, アイルランド
- ⑨ 渡邊昇, 配向分子の電子エネルギー損失分光による励起分子の電子状態の研究, *山田科学振興財団 2011 年度研究交歓会* (招待講演), 2011 年 5 月 28 日, 東京
- ⑩ 渡邊昇, 鈴木大介, 高橋正彦, 角度分解型 EELS を用いた CF₄ の価電子励起の研究, *日本物理学会 2010 年秋季大会*, 2010 年 9 月 26 日, 大阪
- ⑪ N. Watanabe, M. Takahashi, EMS study on the satellite transitions of the neon and argon valence shells, *International Workshop on Frontiers of Electron Momentum Spectroscopy 2010* (招待講演), 2010 年 9 月 9 日, 仙台
- ⑫ N. Watanabe, D. Suzuki, M. Takahashi, Valence shell electronic excitations of CF₄ studied by angle-resolved electron energy loss spectroscopy, *第 26 回化学反応討論会*, 2010 年 6 月 4 日, 東広島

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 昇 (WATANABE NOBORU)
 東北大学・多元物質科学研究所・准教授
 研究者番号: 90312660