

令和 7 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K19009

研究課題名（和文）微小液滴内還元反応による超原子金属クラスターの合成とその光電子イメージング

研究課題名（英文）Synthesis of superatomic metal clusters by microdroplet chemistry and its application to photoelectron imaging

研究代表者

堀尾 琢哉（Horio, Takuya）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40443022

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、微小液滴内還元反応による超原子金属クラスターの合成法を確立し、それを超高効率光電子イメージング法に応用することを目的とした。後者の実験手法により、1)Ag18-とAg15Sc-は等電子系であり、かつそれらのHOMOが強いs性を有すること、2)Ag12M- (M=V, Nb, Ta)は全て等電子系、かつ対称性の極めて高い正二十面体構造を有し、5重縮重した超原子1D軌道を形成すること、3)Ag3-では、被占軌道（HOMOおよびHOMO-1）の反転対称性の有無が、光電子放出角度分布のエネルギー依存性の違いとして現れることを見出した。以上の成果を全て原著論文として専門学術誌にて公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、物理化学とクラスター科学を専門とする研究代表者により、超原子金属クラスターに形成される価電子軌道の軌道エネルギーならびに軌道角運動量状態を明らかにしました。量子サイズ効果の産物であるこれら価電子軌道の特性を明らかにした本成果は、量子論の学理構築に貢献するとともに、超原子物質科学や量子材料研究に資する基礎物理化学的知見を与えた点に、学術的かつ社会的意義があります。さらに、繰返し周波数100kHzという前例の無い効率で光電子可視化計測を実現した点も当該分野において画期的です。今後、超原子金属クラスターを基盤とする機能性物質の開発や量子材料設計への発展が期待されます。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a novel, cost-effective method to synthesize gas-phase superatomic metal clusters via reduction reactions in microdroplets and analyze their electronic structures using a highly efficient photoelectron imaging technique. Through investigations of clusters such as Ag18-, Ag15Sc-, Ag12M- (M=V, Nb, Ta), and Ag3-, we successfully visualized their occupied molecular orbitals and characterize the discrete energy levels and the angular momenta. The findings were supported by quantum chemical calculations and ezDyson simulations, enabling the identification of orbital types (e.g., 1S, 1P, 1D, 2S) and structural symmetries. Notably, the work includes the first angular-momentum-resolved measurements for binary clusters, providing experimental insights into electron behavior in complex quantum systems. These achievements offer a foundation for further advancement in superatom-based material science and quantum nanostructure research.

研究分野：物理化学

キーワード：金属クラスター 光電子イメージング 微小液滴 超原子 量子サイズ効果

1. 研究開始当初の背景

粒径が数十から数百 μm の微小液滴中において、バルクでは起こりにくい化学反応が進行するとの報告がある[1]。例えば水液滴中で還元剤や電荷を注入をすることなく、溶質の還元反応が効率良く進むことが、Zareらのグループにより示された[2]。本研究では、この点に着目し、金、銀、銅などの金属イオンを含む水溶液の微小液滴を発生させ、同イオンの還元反応を効率良く起こすことで、極めて簡便かつ安価な超原子金属クラスタの気相合成に挑戦する。その後、研究代表者がごく最近発案した超高効率光電子イメージング法[3]により、合成した超原子金属クラスタの電子構造

(軌道エネルギーおよび軌道角運動量)を探究する。図1に本研究構想の全体像を示す。

1980年代より、原子が数個から百個程度凝集した金属ナノクラスタの研究が盛んに行われきた。その中で、“超原子”と呼ばれる、あたかも原子のように振舞う金属ナノクラスタ

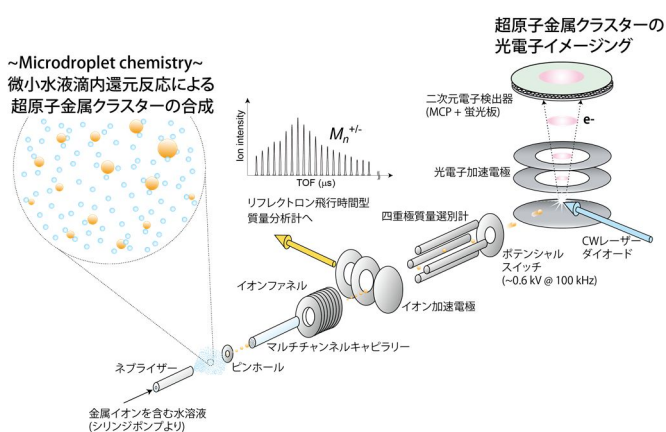


図1. 本研究計画の全体像

が見出された。超原子の金属骨格が、価電子を三次元的に閉じ込める量子井戸となり、そこに原子軌道と類似の“超原子軌道”1S, 1P, 1D, 2S, 1F,...が形成される点に、超原子の本質がある。特に、アルカリ金属・貨幣金属クラスターでは、価電子のs電子が金属骨格中を自由に運動する描像(球状ジェリウム模型)が良い近似となり、実際、それらの光電子スペクトルには離散化された固有(軌道)エネルギーに対応する構造が現れる[4]。この超原子の発見以降、その新奇な量子サイズ効果が注目され、さらに量子材料・元素戦略の観点から、超原子を基盤とする物質科学が国内外で精力的に進められている。

2. 研究の目的

現代科学のあらゆる分野において、電子・原子・分子レベルでの精緻な知見が要求される。これまで、磁気ボトル飛行時間型光電子エネルギー分析器の爆発的な普及により、超原子金属クラスタの電子構造が徐々に明らかになってきた。しかし、S, P, D, ...という軌道角運動量状態まで踏み込んだ実験例は、2009年のvon Issendorffらのグループが報告した、たった一報のみである[5]。軌道角運動量の定量評価は、超原子金属クラスタの化学反応性、ならびに光学応答性を定量的に明らかにする上で必要不可欠であるものの、実験負荷が極めて大きく遅々として進んでいなかった。本研究は、微小液滴内還元反応により超原子金属クラスタを簡便かつ安価に気相合成し、同クラスタに形成される価電子軌道の可視化計測を、前例の無い測定効率で実現することを目的とした。

3. 研究の方法

令和4年度の交付内定後から、微小液滴内還元反応による超原子金属クラスターの合成法の検討を進めてきた。それと同時並行で推進してきた光電子イメージング装置のさらなる高度化において、後述の通り、当該分野を先導する多数の成果を得ることに成功した。既存のマグネトロンスパッタ装置で気相合成した金属クラスターを自作の八重極イオンガイドにより四重極イオン偏向器へと誘導し、そこで負イオン種のみを後続の四重極質量選別器に入射させた。同質量選別器では、単一サイズの金属クラスターが連続イオンビームとして得られる。本実験では、その連続イオンビームをポテンシャルスイッチによりバンチ化し、アインツェルレンズとイオン偏向器でイオンの軌跡を制御しながら、光電子引き出し電極へと導いた。そこに、波長404 nmのCWレーザーダイオード、または繰返し周波数100 kHzのフェムト秒波長可変レーザー(310–2,600 nm)を光源とする光電子画像観測を行った。

4. 研究成果

以下では、年度毎に得られた成果を詳述する。

(1) 2022年度：銀18量体負イオン(Ag_{18}^-)および銀19量体負イオン(Ag_{19}^-)の光電子画像を撮像したところ、原子s軌道からの光電子放出を彷彿とさせる極めて特徴的な角度分布が見出された。両画像から得られた光電子異方性パラメータ β は、それぞれ 1.52 ± 0.03 および 1.08 ± 0.06 であった。前者は、定量比較のために撮像した銀単量体負イオン(Ag^-) ($\text{Kr}: 4d^{10}5s^2$)について得られた値 $\beta = 2 \pm 0.06$ と近く、 Ag_{18}^- の最高被占軌道(HOMO)がS性の強い軌道であることが強く示唆された。実際、量子化学計算より Ag_{18}^- の構造最適化計算を行い、HOMOの電子密度分布を可視化したところ、確かにS性の強い軌道であることが明らかとなった。前述の球状ジェリウム模型によれば、19個の価電子(余剰負電荷含む)は $1S^21P^61D^{10}2S^1$ の電子配置を取ることが予測され、本結果はそのモデルと矛盾しない。さらに Ag_{18}^- と等電子系^注である $\text{Ag}_{15}\text{Sc}^-$ についても画像測定を行ったところ、 $\beta = 1.58 \pm 0.11$ と正の大きな値を示した。同じく量子化学計算により $\text{Ag}_{15}\text{Sc}^-$ の構造最適化計算を行い、HOMOの電子密度分布を可視化したところ、こちらも確かにS性の強い軌道であることを突きとめた。その後、南カリフォルニア大学のAnna Krylovらが開発したezDyson [6]を使い、実験室系光電子放出角度分布のシミュレーションを行ったところ、上記実験結果を定性的に再現することを確認し、以上の解釈が裏付けられた。 Ag_{18}^- および Ag_{19}^- についての結果は、von Issendorffらによるナトリウムクラスター負イオンについて得られた結果[5]に続く実験例であり、 $\text{Ag}_{15}\text{Sc}^-$ については異元素添加系における超原子軌道の形成を可視化計測した世界初の成果である。その重要性を鑑み、本結果を速報誌として取り纏め、2023年2月26日に米国化学会の*J. Phys. Chem. Lett.*に投稿した。その後、同年4月17日に掲載が受理された。

(2) 2023年度：上述の通り、前年度 Ag_{18}^- と等電子系である $\text{Ag}_{15}\text{Sc}^-$ の光電子放出角度分布が極めて強い正の依存性を示すことを見出し、それが最外殻である超原子2S様軌道からの

光電子放出であることを実験ならびに理論計算より突きとめた。さらに当該分野を先導する結果を創出するため、当該年度は金属クラスター科学で象徴的である“13 原子系”に焦点を当て、 Ag_{12}M^- ($\text{M} = \text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$)の光電子画像観測を行った。13 原子系は I_h , D_{5h} , O_h , D_{3h} など極めて高い対称性の骨格を形成できることに加え、同クラスターは余剰電荷も含め 18 個の価電子を有するため $1\text{S}^21\text{P}^61\text{D}^{10}$ のように、希ガスと同じ安定な電子閉殻構造を取ると期待された。しかし、局在化傾向にある d 電子を含む少数多体系であるため、この直感的な予測が正しいかは、懐疑的であった。実際撮影された光電子画像を見ると、三種添加系全ての画像が酷似しており、 Ag_{12}M^- ($\text{M} = \text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$)が全て等電子系であることが示された。加えて、5 重縮退した超原子 1D 軌道からの光電子放出を示す光電子リングが 1 本のみ観測された。超原子 1D 軌道が 5 重縮重となるのは I_h 構造のみであり、それが構造決定の切り札となった。同結果を直ちに取り纏め、2024 年 3 月 13 日に米国化学会の *J. Phys. Chem. Lett.* に投稿し、同年 4 月 9 日に掲載が受理された。

(3) 2024 年度：2023 年度中に取りまとめることができなかった成果についての追試と論文投稿を進めるため、研究期間を 1 年延長した。最終年度は銀三量体負イオン Ag_3^- の HOMO および HOMO-1 の電子束縛エネルギーに加え、その軌道角運動量も定量的に評価した。前者は過去に実測例が存在するが、後者は無い。HOMO は超原子 1P 様軌道、HOMO-1 は超原子 1S 様軌道と分類することができるため、前者からは s および d 波が、後者からは p 波が光電子部分波として主に放出されることが期待される。実際、繰返し 100 kHz のフェムト秒波長可変レーザーを用い、光電子運動エネルギーを少しずつ変化させることで、両軌道から放出された光電子を注意深く可視化した。まず当該分野を精査したところ、100 kHz という超高繰返しレーザーを用いた負イオン光電子画像観測は、研究代表者らが初めての試みであることが判明した。本手法の独創性を広く示すため、その方法論を記した原著論文を直ちに取り纏めた。2024 年 10 月 24 日に米国物理学協会の *The Journal of Chemical Physics* の Note として投稿後、同年 12 月 26 日に掲載が受理された。以上の測定で得られた Ag_3^- の HOMO に対する実験室系光電子放出角度分布(LF-PAD)を注意深く解析すると、光電子発生しきい値近傍では s 波が支配的であることが分かった。その後、運動エネルギーの増加とともに、d 波との干渉が起こる様子が明瞭に観測された。HOMO-1 について得られた LF-PAD は、光電子発生しきい値近傍から p 波が支配的であり、レーザー偏光軸方向に強い異方性を示した。以上の結果は、ezDyson[6]による LF-PAD のシミュレーションでも定性的に再現することが出来た。さらに測定対象を銀三量体負イオンの励起状態にまで拡張し、フェムト秒パルスで過渡的に生成した S_1 状態からの光電子放出を観測し、同状態の電子構造を反映した光電子スペクトルを得ることに成功した。以上の成果を取り纏め、2025 年 3 月 13 日に米国物理学協会の専門学術誌 *The Journal of Chemical Physics* に投稿した。

以上は、金属クラスターの電子構造を実験および理論により詳細に調べることで得た成果で

ある。超原子を基盤とする物質科学や微小液滴内還元反応を利用した金属クラスター合成法に資する基礎物理化学的な知見を与えた点に、本研究成果の科学のおよび社会的意義がある。これらを布石として、今後、本研究をさらに発展させていく予定である。

引用文献

- [1] X. Yan, *Int. J. Mass. Spectrom.* **468**, 116639 (2021).
- [2] J. K. Lee et al., *J. Am. Chem. Soc.* **141**, 10585 (2019).
- [3] T. Horio et al., *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 083302 (2022).
- [4] H. Handschuh et al., *J. Chem. Phys.* **102**, 6406 (1995).
- [5] C. Bartels et al., *Science.* **323**, 1323 (2009).
- [6] S. Gozem, and A.I. Krylov, *WIREs Computational Molecular Science* **12**(2), (2022).

注:ここでは価電子の数が等しいという意味で使用。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Suzuki Yuta, Matsumoto Kazuaki, Nomi Rin, Arakawa Masashi, Horio Takuya, Terasaki Akira	4. 巻 15
2. 論文標題 Photoelectron Imaging Signature for Selective Formation of Icosahedral Anionic Silver Cages Encapsulating Group 5 Elements: M@Ag ₁₂ - (M = V, Nb, and Ta)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4327 ~ 4332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.4c00775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kono Satoshi, Fujimoto Shuhei, Ito Tomonori, Arakawa Masashi, Horio Takuya, Terasaki Akira	4. 巻 17
2. 論文標題 Photoabsorption of silver cluster cations in an ion trap: nonlinear action spectra via multi-photon dissociation vs. directly measured linear absorption spectra	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 4408 ~ 4414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D4NR03563A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Horio Takuya, Nishizato Tasuku, Suzuki Yuta, Matsumoto Kazuaki, Terasaki Akira	4. 巻 162
2. 論文標題 Anion photoelectron velocity-map imaging using a tunable laser at a 100-kHz repetition rate	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 26101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0245252	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kento Minamikawa, Tasuku Nishizato, Haruki Hashimoto, Kazuaki Matsumoto, Masashi Arakawa, Takuya Horio, and Akira Terasaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Probing Superatomic Orbitals of Sc-Doped and Undoped Silver Cluster Anions via Photoelectron Angular Anisotropy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4011-4018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.3c00538	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 Shun Kawamura, Masato Yamaguchi, Satoshi Kono, Masashi Arakawa, Tomokazu Yasuike, Takuya Horio, and Akira Terasaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Photodestruction Action Spectroscopy of Silver Cluster Anions, AgN ⁻ (N = 3 - 19), with a Linear Ion Trap: Observation of Bound Excited States above the Photodetachment Threshold	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 6063-6070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.3c02900	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 Takuya Horio, Kento Minamikawa, Tasuku Nishizato, Haruki Hashimoto, Kazuaki Matsumoto, Masashi Arakawa, and Akira Terasaki	4. 巻 93
2. 論文標題 Photoelectron imaging of size-selected metal cluster anions in a quasi-continuous mode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 83302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0097968	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22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 牛木優太、松本一陽、鈴木悠太、能見倫、荒川雅、堀尾琢哉、寺寄亨
2. 発表標題 光電子イメージングと密度汎関数理論を用いたアルミニウムクラスター 負イオンAln ⁻ (n = 4 - 13)の電子・幾何構造の研究
3. 学会等名 ナノ学会第22回大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuta Suzuki, Daiki Matsumura, Akira Terasaki, Takuya Horio
2. 発表標題 Angular momentum projection analysis of superatomic orbitals formed in doped- and undoped-silver cluster anions
3. 学会等名 The 39th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 能見 倫、鈴木 悠太、牛木 優太、松本 一陽、堀尾 琢哉、寺寄 亨
2. 発表標題 アルミニウム添加銀クラスター負イオンのサイズ発展に伴う電子・幾何 構造の変化：光電子イメージングと密度汎関数理論による研究
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 青沼優奈、平川未歩、川村右京、飯田岳史、山口雅人、荒川雅、堀尾琢哉、寺寄亨
2. 発表標題 3d遷移金属原子を添加した銀クラスター正イオンの光解離分光：添加元素種によるスペクトルの変化
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 堀尾琢哉、鈴木悠太、能見倫、牛木優太、寺寄亨
2. 発表標題 負イオン光電子イメージングによる 異元素添加銀クラスター超原子軌道の可視化
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 牛木優太、能見倫、鈴木悠太、松本一陽、堀尾琢哉、寺寄亨
2. 発表標題 紫外光電子イメージングによるアルミニウムクラスター負イオンの 電子・幾何構造の研究：銀クラスターとの比較
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平川 未歩、青沼 優奈、川村 右京、飯田 岳史、山口 雅人、荒川 雅、堀尾 琢哉、寺寄 亨
2. 発表標題 紫外・可視光解離分光によるAgNM+ (M = Sc, Al) の 幾何・電子構造の解析
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木 悠太、寺寄 亨、堀尾 琢哉
2. 発表標題 金属クラスター負イオンに形成される超原子軌道の軌道角運動量解析
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川村 右京、平川 未歩、青沼 優奈、飯田 岳史、Olga V. Lushchikova、荒川 雅、堀尾 琢哉、寺寄 亨
2. 発表標題 紫外・可視光解離分光によるCuクラスター正イオンの幾何構造の探究
3. 学会等名 第18回分子科学討論会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 堀尾琢哉
2. 発表標題 超原子軌道の可視化：金属クラスター中に束縛された電子の振る舞いを探る
3. 学会等名 日本分光学会中国四国支部令和5年度年次講演会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 堀尾 琢哉, 松本 一陽, 鈴木 悠太, 能見 倫, 西里 将, 荒川 雅, 寺寄 亨
2. 発表標題 高繰返し波長可変レーザーによる金属クラスター負イオンの光電子画像観測
3. 学会等名 第17回分子科学討論会2023 大阪
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本 一陽, 鈴木 悠太, 能見 倫, 西里 将, 飯田 岳史, 山口 雅人, 荒川 雅, 寺寄 亨, 堀尾 琢哉
2. 発表標題 イベント駆動型イメージセンサによる光電子画像の高速取得: 重心演算を用いた画像分解能の向上
3. 学会等名 第17回分子科学討論会2023 大阪
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 悠太, 松本 一陽, 能見 倫, 西里 将, 山口 雅人, 荒川 雅, 堀尾 琢哉, 寺寄 亨
2. 発表標題 5族金属元素内包正二十面体型銀クラスター負イオンM@Ag ₁₂ - の光電子イメージング: 正二十面体構造の同定と超原子軌道の可視化
3. 学会等名 第17回分子科学討論会2023 大阪
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 能見 倫, 橋本 治暉, 西里 将, 松本 一陽, 鈴木 悠太, 荒川 雅, 堀尾 琢哉, 寺寄 亨
2. 発表標題 光電子イメージングによる3族および13族元素添加銀クラスター負イオンの電子・幾何構造の研究
3. 学会等名 第17回分子科学討論会2023 大阪
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Suzuki, Tasuku Nishizato, Haruki Hashimoto, Kazuaki Matsumoto, Rin Nomi, Masashi Arakawa, Takuya Horio, and Akira Terasaki
2. 発表標題 Photoelectron imaging of icosahedral silver cluster anions doped with a group 5 metal atom: Ag ₁₂ M ⁻ (M = V, Nb, and Ta)
3. 学会等名 The 38th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 能見 倫, 橋本 治暉, 西里 将, 松本 一陽, 鈴木 悠太, 荒川 雅, 堀尾 琢哉, 寺寄 亨
2. 発表標題 光電子イメージングによるAg _n M ⁻ (M = Al, Sc)の電子・幾何構造の研究: 3族Scと13族Alとの比較
3. 学会等名 ナノ学会第21回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Minamikawa, Tasuku Nishizato, Haruki Hashimoto, Kazuaki Matsumoto, Masashi Arakawa, Takuya Horio, and Akira Terasaki
2. 発表標題 Photoelectron imaging spectroscopy of Sc-doped silver cluster ani
3. 学会等名 The 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tasuku Nishizato, Kento Minamikawa, Haruki Hashimoto, Kazuaki Matsumoto, Masashi Arakawa, Takuya Horio, and Akira Terasaki
2. 発表標題 Exploring superatomic orbitals of size-selected silver cluster anions by photoelectron imaging
3. 学会等名 The 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本治暉, 西里将, 松本一陽, 南川賢人, 荒川雅, 堀尾琢哉, 寺寄亨
2. 発表標題 光電子イメージングと密度汎関数理論によるスカンジウム添加銀クラスター負イオンの構造解析
3. 学会等名 第59回化学関連支部合同九州大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本 治暉, 南川 賢人, 西里 将, 松本 一陽, 荒川 雅, 堀尾 琢哉, 寺寄 亨
2. 発表標題 スカンジウム添加銀クラスター負イオンの光電子イメージング
3. 学会等名 第16回分子科学討論会2022 横浜
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本一陽, 西里将, 橋本治暉, 南川賢人, 荒川雅, 堀尾琢哉, 寺寄亨
2. 発表標題 Koopmansの定理に基づく銀クラスター負イオンの垂直電子脱離 エネルギー: 長距離補正密度汎関数理論による予測精度の向上
3. 学会等名 第16回分子科学討論会2022 横浜
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西里 将, 南川 賢人, 橋本 治暉, 松本 一陽, 荒川 雅, 堀尾 琢哉, 寺寄 亨
2. 発表標題 銀及び遷移金属添加銀クラスター負イオンの光電子イメージング: 超原子2S軌道の可視化と理論的検証
3. 学会等名 第16回分子科学討論会2022 横浜
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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