

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03901

研究課題名(和文)局在性と非局在性の拮抗を解き明かす金属クラスターの電子論開拓

研究課題名(英文)A study of electrons in metal clusters competing between localization and delocalization

研究代表者

寺崎 亨(Terasaki, Akira)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：60222147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：電子の局在/非局在現象に焦点を当て、微小な金属粒子中の電子の挙動を解明する研究を推進した。第一に、銀クラスター中のs電子に着目して2量体から90量体までの光吸収スペクトルを測定し、電子励起の集団性を評価して、分子的な挙動からナノ粒子的な様相へと繋がる光学応答の変化を捉えた。第二に、遷移金属原子を添加した銀クラスターを対象に、化学反応と光電子イメージングによる電子構造研究に取り組み、添加原子が内包されるとd電子が非局在化し、電子則に従って安定化学種が形成されることを見出した。このように、原子1個を操るクラスター科学の方法論で、次世代のナノ物質科学の開拓につながる成果をあげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、現状のナノテクノロジーが扱うナノ粒子よりもさらに小さな未開拓サイズ領域の微小金属粒子を研究対象とし、その電子論を展開した点に大きな学術的意義がある。研究成果を発表した論文のうち2報が物理化学分野で国際的に権威ある学術誌のHot Articleに選出されるなど、国内外で高く評価されている。これら金属クラスターは、量子材料をはじめとする次世代材料の中核に位置づけられ、今後、新規機能性材料としてナノフォトニクス、ナノエレクトロニクスなどの変革が期待される点で、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at investigation of electrons in metal clusters in terms of their competing behavior between localization and delocalization. First, we measured optical absorption spectra of silver clusters in a broad size range from dimer up to 90-mer, which revealed the change in their optical responses from molecular-like to nanoparticle-like behavior by evaluating collectivity of electrons. Second, we investigated electronic structures of silver clusters doped with a transition-metal atom by chemical reaction and photoelectron imaging experiments. We found that an electron-counting rule governs the stability of clusters, where d electrons participate through their delocalization upon encapsulation of the dopant atom. Manipulating clusters in a single-atom precision, the present study made advances in nano materials science.

研究分野：ナノ物理化学

キーワード：金属クラスター 電子構造 電子励起 電子局在/非局在 s-d電子相互作用 光吸収分光 光電子イメージング 超原子軌道

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

金属ナノ粒子の光応答はナノフォトニクスを原理を考える基本であるとともに、光と電子との相互作用を介してナノエレクトロニクスにも直結する。これら光学現象、伝導現象は、粒子の大きさとともにどのように変質するであろうか。このような物性のサイズ効果に関して、いわゆるトップダウンの方向で物質の微細化が進められてきたナノテクノロジーで、工業的に扱われる物質の寸法は数ナノメートル (nm) に達している。しかし、これら僅か数 nm の物質でさえも、それを構成する原子の数は数万個以上にのぼる。これに対して、少数原子の集合体 (クラスター) の科学は、原子の数が正確に規定された物質群を扱う学問として発展してきた。数個から数十個の原子の集合体の研究がボトムアップの方向で進められ、原子 1 個の増減で物性が劇的に変わる現象など、原子 1 個を操る究極のナノ物質科学の開拓に向けて益々注目が高まっている。ところが、どちらのアプローチからも原子数が数十個から百個程度の領域は未開拓であった。このギャップ領域について、例えば、銀ナノ粒子等のプラズモニクスで重要な電子の集団励起現象がどこまで小さな粒子で発現するのか、また、固体金属中の自由電子 (s 電子) のバンド構造が微粒子では離散的な電子準位へと変化する中で、s 電子と相互作用する磁性原子上の局在スピン (d 電子) はどのように振る舞うのかなど、クラスター領域の金属電子論の構築が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、電子の局在性と非局在性が拮抗するクラスター領域の金属の電子論開拓を目的とし、次の 2 点に特に着目した。

- (1) s 電子の局在/非局在性: 銀クラスターが成長してナノ粒子に至る過程で発現する表面プラズモン共鳴に関して、素励起のコヒーレントな重ね合わせによって電子の集団性が発現する過程を、独自の分光実験で捉える。定量性のある測定結果を量子化学理論で解析し、クラスターの物性が分子的な振る舞いからナノ粒子的な挙動に移り変わる成長過程を明らかにする。
- (2) d 電子の局在/非局在性: 磁性原子をドーピングした銀クラスターにおいて、磁性原子上の d 電子が担う局在スピニングが、系の価電子数に依存して保持もしくは消失するとの仮説を、化学反応性の測定および分光実験で検証する。局在性/非局在性を決める因子として、構成原子数(サイズ)のほか、それに応じたクラスター内の電子数、幾何構造などが考えられ、これらを正確に制御した系統的な実験とともに、量子論に基づく理論解析を行って、鍵となる因子を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) サイズ選別金属クラスターの生成

図 1 に実験装置図を示す。我々の実験の特色は、サイズが正確に定まったクラスター粒子を生成し、原子数 1 個の違いによる物性・反応性の変化を精密に捉える点にある。特に、金属クラスターを大量に生成する手段として、マグネトロンスパッタ法を採用し、イオン種のクラスターを連続ビームとして発生した (クラスター生成部)。種々のサイズが混合したこの連続ビームに質量分析技術の一つである四重極質量分析計を適用し、サイズ選別された金属クラスターの正イオン種もしくは負イオン種を得た (質量選別部)。s 電子を提供する元素として銀 (Ag) に着目し、d 電子の挙動の研究には、銀クラスターに 3d 遷移金属 M (M=Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) を 1 原子ドーピングした添加系クラスターを試料とした。

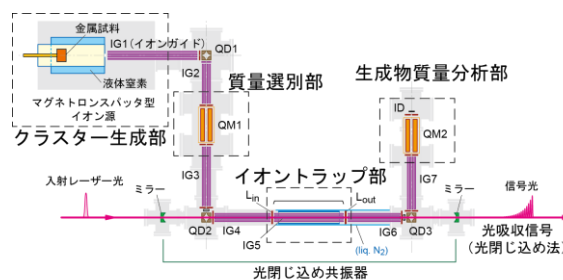


図 1. 実験装置

(2) 光解離/光吸収分光とその理論解析

分光実験は、正イオン種を対象とした。サイズ選別後のクラスターをさらに下流に導いて直径 11 mm、長さ 400 mm の空間に捕捉し、元来希薄なクラスターを高密度に蓄積して試料とした (イオントラップ部)。トラップ内のクラスターに波長可変レーザー光を照射し、2 種の分光実験を相補的に行った。第一に、光吸収後のクラスターの光解離収量を計測した。すなわち、光吸収の作用スペクトルを測定した (光解離分光)。第二に、光解離に依らず、真の光吸収スペクトルの測定を行った。すなわち、試料による透過光の微弱な減衰を、高反射率ミラーで構成された共振器を利用して超高感度に測定した (光閉じ込め分光)。光閉じ込め分光は、光吸収を直接捉える点で優れているが、測定可能な波長領域がミラーの特性に応じて狭い範囲に限定される。一方で、光解離分光は、間接的な手法であるが、広帯域のスペクトルの測定に適している。なお、波長可変レーザーには、本研究で導入した光パラメトリック発振 (OPO) レーザーを使用し、紫外から赤外にわたる広波長域のスペクトルを短時間で得ることを可能にした。理論解析では、密度汎関

数法 (DFT 計算) によるクラスターの構造最適化と励起スペクトルの計算を行ったほか、光吸収線に關与する素励起 (分子軌道間の遷移) の数を解析して、電子励起過程における電子の集団性の評価を試みた。

(3) 反応性測定とその理論解析

反応実験は、正・負両イオン種を対象とした。イオントラップ部に O_2 , NO などの反応ガスを導入し、捕捉したクラスターと一定時間反応させた後、イオントラップから引き出して生成物を質量分析した (生成物質量分析部)。ただし、主に反応実験に用いたもう一台の装置では、この生成物分析部に飛行時間型質量分析計を採用し、多岐にわたる生成物を同時に検出して測定を効率化した。捕捉時間を数十ミリ秒から数秒の範囲で変えながら、時々刻々と変化する各生成物の生成量を測定し、反応速度定数の測定のほか、反応経路の解析を行った。理論解析では、DFT 計算で最適化した構造に対して、電子構造と各軌道の波動関数を計算し、反応性の起源を考察するとともに超原子軌道の描像を評価した。

(4) 光電子イメージング分光とその理論解析

当初の計画には入っていなかったが、負イオン種の電子構造解析には光電子分光が必須と考え、装置の設計・製作を行った。特に、画像観測法 (イメージング) で光電子の放出角度分布を捉えると、始状態の電子の軌道角運動量を決定できる。理論解析には DFT 法を用い、垂直電子脱離エネルギーを計算して実験結果と比較した。また、光電子放出角度分布については、s 軌道から放出される電子は p 波の特性を持つことなど、遷移選択則を手掛かりとした。

4. 研究成果

(1) s 電子の局在/非局在性：銀クラスターの光解離/光吸収分光と光電子イメージング

① 銀クラスター正イオンの光吸収分光

電子励起の集団性について、銀クラスター正イオン Ag_N^+ の光解離分光を、サイズ $N = 2 \sim 90$ 量体の範囲について行い、スペクトル形状の特徴的なサイズ依存性を捉えた。図 2 にいくつかのサイズのスペクトルを示す。小さなサイズでは $N=11$ のように多数の吸収線が現れ、しかもその数や波長がサイズ毎に大きく変化した。その傾向が $N=20$ 程度まで続いた。それに対して大きなサイズでは、 $N=35$, 50 のように吸収が特定の波長に次第に集中するとともに、大きなサイズほど吸収線が低エネルギーへシフトした。さらにサイズが大きくなると、 $N=70$ のようにスペクトルは 2 本に分裂した。その先、さらに $N=90$ までを実験すると、スペクトルは再び 1 本に合一した。 $N=50$ から 90 までのこの変化は、電子の閉じ込めポテンシャルが球対称な 55 量体付近および 92 量体付近に対して、その途上のサイズでは、回転楕円体状の 2 軸に対応して 2 本の吸収ピークが現れると解釈でき、非局在化した自由電子の集団励起の様相とクラスターの幾何学的構造との間の相関が明らかとなった。

なお、大きなサイズほどスペクトルの線幅が狭く見えるのは、多光子過程の寄与である。すなわち、光解離収量の照射光強度依存性を測定したところ、 $N < 17$ では一光子解離、 $N > 18$ で二光子解離、さらにおよそ $N > 35$ では三光子、 $N > 55$ では四光子、 $N > 65$ では五光子にも達した。そのため、一光子吸収のスペクトルを測定するには、光吸収の直接測定が可能な光閉じ込め分光が必須であり、広い波長域をカバーするために最適波長の異なる 3 組のミラーを用意して測定を行った。代表的ないくつかのサイズで測定を試みたところ、実際のスペクトル幅は光解離スペクトルの幅よりも広いことが実測できた。光閉じ込め分光では、同時に吸収断面積を評価できるため、スペクトル形状と合わせた定量的なスペクトルから、振動子強度 (吸収の積分強度に比例する量) を算出した。これは遷移に關与する電子の数を与え、およそ $N = 30$ を超えると、1 電子あたりの振動子強度がナノ粒子と同程度にまで大きくなり、電子の集団性の発現を示唆する結果を得た。吸収線に關与する素励起の数に關する理論とも突き合わせた定量的な解析を、今後さらに進めてゆく。

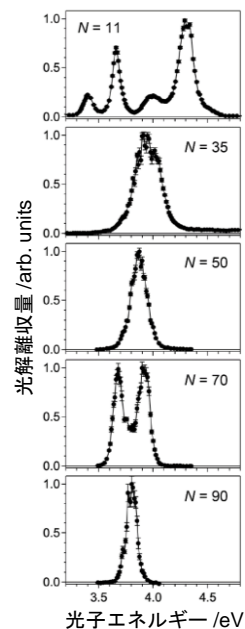


図 2. Ag_N^+ の光解離スペクトル

② 銀クラスター負イオンの光電子イメージング

銀クラスター 18 量体の負イオン種 Ag_{18}^- は 19 個の価電子を持ち、ジェリウム模型で記述される超原子軌道への電子配置は $(1S)^2(1P)^6(1D)^{10}(2S)^1$ である。この Ag_{18}^- について、光電子イメージングの測定結果を電子配置図とともに図 3 に示す。光電子の放出角度分布は、矢印で示したレーザーの偏光方向に強く偏った p 波の特徴を示している。p 波を示すこの画像から、超原子 2S 軌道が実際に銀クラスター内に形成され、非局在化した価電子が収容されていることが明らかとなった。

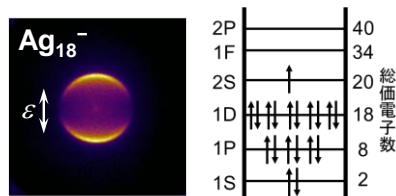


図 3. Ag_{18}^- の光電子イメージングと超原子軌道への電子配置

(2) d 電子の局在／非局在性：遷移金属を添加した銀クラスターの反応と光電子イメージング

① 酸素分子 O_2 との反応

酸素分子との反応性が一般に閉殻電子系で高く閉殻系で低いことを利用して、銀クラスター中にドーピングされた遷移金属原子 M ($M = Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$) を研究対象として、s 電子と相互作用する 3d 電子の局在／非局在性の検証を行った。例えば、固体 Ag 中では 3d 電子が局在傾向であるのに対し、 Ag クラスター中では非局在化が起き得ることが先行研究で示唆されていた。つまり、 $Ag_N M^{+}$ では、 $N = 9$ で d 電子を含めた価電子数が 18 個 (18 電子系) であり、電子閉殻構造が形成されると $N = 8, 10$ よりも低い反応性が予測される。同様に、負イオン種 $Ag_N M^{-}$ では、 $N = 7$ で低い反応性が期待される。このように、正・負の両イオン種を対象とし、遷移金属種 M を周期表に沿って変えながら、サイズ N に依存して変化する反応性の評価実験を系統的かつ網羅的に行い、局在／非局在に及ぼす価電子数の効果を明らかにする研究に取り組んだ。

その結果、 $M = Sc, Ti, V, Fe, Co, Ni$ の場合について図 4 の結果を得た。すなわち、正イオン種では、すべての添加元素について、d 電子を含む 18 電子系 $Ag_{16}Sc^+$ 、 $Ag_{15}Ti^+$ 、 $Ag_{14}V^+$ 、 $Ag_{11}Fe^+$ 、 $Ag_{10}Co^+$ 、 Ag_9Ni^+ が反応性極小を示した。負イオン種では、 Sc, Ti, V 添加種で d 電子を含む 18 電子系 $Ag_{14}Sc^-$ 、 $Ag_{13}Ti^-$ 、 $Ag_{12}V^-$ が反応性極小を示した。特にこれら負イオン種は、本研究で新たに発見された安定種である。これら安定種の電子構造について、DFT 計算による理論解析をさらに行った。一例として、 Sc 添加種の正／負イオン種 $Ag_{16}Sc^+ / Ag_{14}Sc^-$ の計算結果を図 5 に示す。このように、添加原子の 3d 軌道が銀や添加原子自身の s 軌道と混合して非局在化し、クラスター全体に広がった 1S、1P、1D 超原子軌道が形成されることが示され、1D 軌道までが 18 電子で充満した電子閉殻構造が安定性の起源であることを突き止めた。一方、 Fe, Co, Ni を添加した負イオン種では、18 電子系 Ag_9Fe^- 、 Ag_8Co^- 、 Ag_7Ni^- が高い反応性を示し、安定種とは見なせない結果となった (図 4)。DFT 計算の結果、クラスター表面に露出した添加原子に 3d 軌道が局在し、電子構造が閉殻であることが示され、図 5 の $Ag_{16}Sc^+$ や $Ag_{14}Sc^-$ のように、遷移金属原子が銀原子で取り囲まれる内包構造が非局在化の機構として重要であると考察した。

以上、正・負の両イオン種の結果を総合して、添加原子が内包されると 3d 電子の非局在化が促進されること、その際、3d 軌道も寄与して超原子軌道が形成されること、さらに、超原子軌道が充満し閉殻となる価電子数で安定化学種が形成されることを突き止めた。

なお、 Cr, Mn 添加種では、正・負イオン種ともに 18 電子系での反応性極小は現れず、DFT 計算の結果とも合わせて、半閉殻 3d 軌道の安定性が高いために 3d 電子は局在傾向にあると結論した。

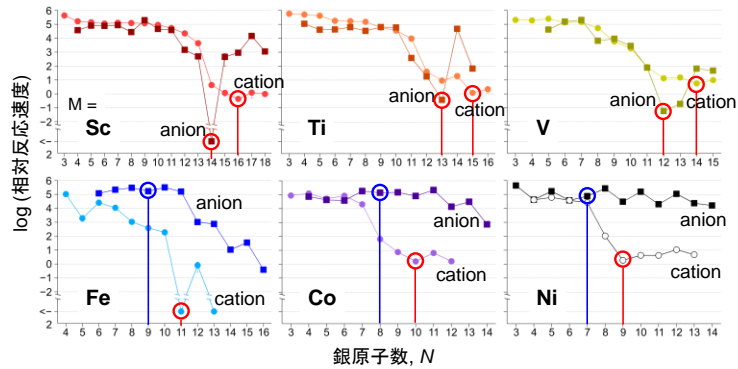


図 4. $Ag_N M^{+/−}$ と O_2 分子との反応のサイズ依存性

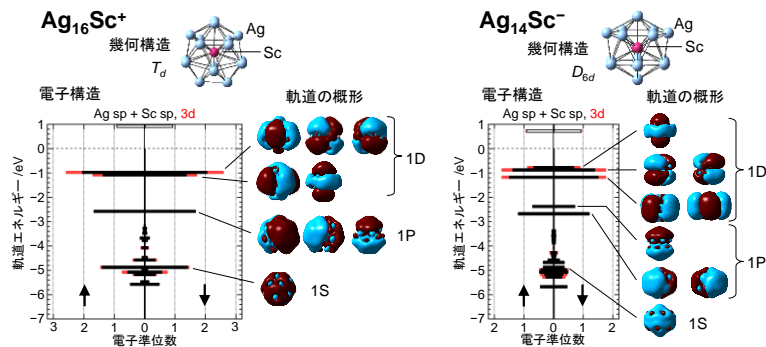


図 5. DFT 計算による $Ag_{16}Sc^+$ および $Ag_{14}Sc^-$ の解析

② 一酸化窒素分子 NO との反応

NO 分子との反応では、 O_2 分子との反応で見られた反応性極小が同様に現れたが、相違点として、単純な分子吸着や解離ばかりでなく、種々の反応過程が見出された。正イオン種に絞って実験を行った結果、添加原子が内包されない小さなサイズでは、添加元素種によって異なる反応が観測された。すなわち、前期遷移金属 ($M = Sc, Ti, V$) を添加したクラスター種では、酸化物 $Ag_M MO_m^+$ が生成した。後期遷移金属 ($M = Cr, Mn, Fe, Co, Ni$) の場合には、 NO が逐次的に付加して $Ag_N M(NO)_m^+$ が生じた。添加元素による生成物の差異は、反応サイトとなる遷移金属の性質に起因すると考察された。一方、添加原子が内包される大きなサイズでは、元素種によらず、主生成物が NO_2 付加物 $Ag_N M(NO_2)_m^+$ であった。このことは、反応サイトが銀へと移り変わった結果と考察された。銀に固有と考えられるこの反応機構を探究するために、無添加の銀クラスター Ag_N^+ と NO 分子との反応をさらに実験した。

Ag_N^+ は、NO との逐次反応により $\text{Ag}_m\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ と $\text{Ag}_m(\text{NO}_2)_m^+$ ($m \geq 1$) を生じた。これらを生ずる反応経路は、サイズに応じて 2 通り存在した。一つは中間体 $\text{Ag}_m\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ を経由して $\text{Ag}_m(\text{NO}_2)_m^+$ を生成するもので、 $N=4, 6, 9$ がこれに該当した。一方、 $N=7, 8, 10, 11, 12, 15$ では、 Ag_mO^+ と Ag_mNO_2^+ が、中間体を経ずに Ag_N^+ から同時に生成し、さらに NO_2 の逐次的な付加が起きて $\text{Ag}_m\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ と $\text{Ag}_m(\text{NO}_2)_m^+$ ($m \geq 2$) が生成した。つまり、3 分子の NO から NO_2 と N_2O を生ずる不均化反応が起きたと推察された。このように、クラスター上で多数の NO 分子が互いに反応する現象を見出した。

③ 添加系銀クラスター負イオンの光電子イメージング

反応性実験で、Sc, Ti, V 添加種の正・負イオン種において価電子数 18 個の安定サイズを発見した。非局在化した d 電子が寄与すると考えられるこの安定性の起源を探るために、負イオン種の光電子分光に取り組んだ。特に、光電子の放出角度分布を画像観察する光電子イメージング技術を取り入れ、図 3 右図のような超原子軌道から成る電子構造がこれら添加種においても形成されるか否かに注目した。その結果、19 電子系 $\text{Ag}_{15}\text{Sc}^-$ 、 $\text{Ag}_{14}\text{Ti}^-$ から放出される光電子の角度分布が、 Ag_{18}^- (図 3 左図) と同様に、レーザーの偏光方向に著しく偏った p 波の特徴を示すことを見出し、始状態が s 型軌道であること、つまり理論が予想する超原子 2S 軌道を実験的に明示した。このことから、18 電子系は 1D 軌道までが充満した電子閉殻構造と考えられ、 $\text{Ag}_{14}\text{Sc}^-$ 、 $\text{Ag}_{13}\text{Ti}^-$ に見られた特異的に低い反応性と矛盾しない。ただし、反応性の大小には電子構造以外にも種々の要素が関係するため、その解釈にはさらに多面的な議論を要する。なお、V 添加種では光電子画像の様相が Sc, Ti 添加種とは異なり、この点も今後の新たな課題となった。

(3) 関連して得られたその他の成果

① 大きな金属クラスターの発生： 広いサイズ領域で物性・反応性のサイズ依存性を実験するために、大きなクラスターの発生方法を検討した。具体的には、銀クラスターの成長過程を発光分析法で調べ、発生する銀原子量とサイズ分布との関係を解析した。その結果、クラスター生成条件を適切に制御して、100 量体程度までの比較的大きなサイズの実験を実現した。

② 飛行時間型質量分析計の高感度化： 飛行時間型質量分析計に実装されているリフレクトロンを独自の設計で新たに開発し、検出感度を向上した。リフレクトロンは、イオンビームを折り返した際のエネルギー収束効果によって質量分解能を高める装置であるが、イオントラップから引き出したイオンのように運動エネルギーの分布幅の広いイオンに対しては、折り返し後のビームが広がって検出器から外れることが問題となっていた。そこで、イオンの飛跡シミュレーションに基づいて空間集束性能の高いリフレクトロンを設計・製作し、検出感度を改善した。

(4) まとめと展望

以上のように、当初の計画に沿って研究を推進し、研究の進展に応じて発展的な課題にも取り組んだ。主要な成果として、s 電子系の光応答の研究では、銀クラスターの 2 量体から 90 量体に及ぶ広いサイズ領域で光吸収スペクトルを測定し、分子軌道間遷移からナノ粒子の表面プラズモン共鳴へと繋がる変化を捉えた。また、吸収断面積の定量的な測定を通して電子励起の集団性を定量化した。d 電子の非局在化挙動の探究では、遷移金属原子を添加した銀クラスターを対象として反応性を介した電子構造・幾何構造の解明に取り組み、複数の新たな安定化学種を発見した。加えて、クラスター中の価電子数が物性・反応性を支配する電子則と、その成立条件を明らかにした。さらに、非局在化した価電子の電子構造について、ジェリウム模型が予想する超原子軌道の描像を光電子イメージング法で探究し、特に超原子 2S 軌道の形成を実証した。

これらの成果は国内外で高く評価され、第 13 回分子科学会優秀ポスター賞 (研究協力者・河野聖、2019 年)、分子科学会オンライン討論会学生優秀講演賞 (河野聖、2020 年)、英国王立化学会 PCCP HOT Article 選出 2 件 (M. Arakawa et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23**, 22947 (2021); K. Minamikawa et al., *ibid.* **24**, 1447 (2022)) などの表彰を受けた。また、研究協力者・南川賢人が「遷移金属添加銀クラスターの電子構造・幾何構造：化学反応と負イオン光電子イメージングによる s-d 相互作用のサイズ依存性探究」の論文名で博士 (理学) の学位を取得し (2022 年)、若手研究者の育成にも成果があった。

クラスターの分光と化学反応とを組み合わせた本研究の方法論が、今後、種々のクラスター種に適用され、電子構造・幾何構造の実測を基盤とした電子論の構築が益々進展することが期待される。将来展望として、クラスターは量子材料など次世代材料の中核に位置づけられ、その特異な物理的・化学的性質を操作・制御して、新規機能性材料として活用されることを期待したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Minamikawa Kento, Sarugaku Shun, Arakawa Masashi, Terasaki Akira | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Electron counting in cationic and anionic silver clusters doped with a 3d transition-metal atom: endo- vs. exohedral geometry | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics | 6. 最初と最後の頁 1447 ~ 1455 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CP04197E | 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 Arakawa Masashi, Horioka Masataka, Minamikawa Kento, Kawano Tomoki, Terasaki Akira | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Reaction of nitric oxide molecules on transition-metal-doped silver cluster cations: size- and dopant-dependent reaction pathways | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics | 6. 最初と最後の頁 22947 ~ 22956 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CP02882K | 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 Arakawa Masashi, Horioka Masataka, Minamikawa Kento, Kawano Tomoki, Terasaki Akira | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 Reaction Kinetics of Nitric Oxide on Size-Selected Silver Cluster Cations | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 26881 ~ 26888 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c08890 | 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 Arakawa Masashi, Okada Daichi, Kono Satoshi, Terasaki Akira | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 Preadsorption Effect of Carbon Monoxide on Reactivity of Cobalt Cluster Cations toward Hydrogen | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A | 6. 最初と最後の頁 9751 ~ 9756 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.0c05819 | 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 Minamikawa Kento, Arakawa Masashi, Tono Kensuke, Terasaki Akira | 4. 巻 753 |
| 2. 論文標題 A revisit to electronic structures of cobalt-doped silver cluster anions by size-dependent reactivity measurement | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 137613 ~ 137613 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2020.137613 | 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 Handa Takefumi, Horio Takuya, Arakawa Masashi, Terasaki Akira | 4. 巻 451 |
| 2. 論文標題 Improvement of reflectron time-of-flight mass spectrometer for better convergence of ion beam | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry | 6. 最初と最後の頁 116311 ~ 116311 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijms.2020.116311 | 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 Kono Satoshi, Arakawa Masashi, Terasaki Akira | 4. 巻 48 |
| 2. 論文標題 Analysis of Cluster Growth in Magnetron-sputtering Metal-cluster Source by Optical Emission Spectroscopy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemistry Letters | 6. 最初と最後の頁 1537 ~ 1540 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190727 | 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 Sarugaku, Masashi Arakawa, Tomoki Kawano, and Akira Terasaki | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Electronic and geometric effects on chemical reactivity of 3d-transition-metal-doped silver cluster cations toward oxygen molecules | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 25890-25897 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b05117 | 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55件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 19件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Electronic properties of silver and doped-silver clusters studied by laser spectroscopy and chemical reaction |
| 3. 学会等名 Pacifichem: Advanced Functional Clusters and Nanostructured Materials (Symposium #416) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Terasaki, K. Minamikawa, and M. Arakawa |
| 2. 発表標題 Transition-metal-doped silver clusters: Examining electron-counting effect in cations and anions |
| 3. 学会等名 Symposium on Size-Selected Clusters (S3C) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Size-dependent optical responses of free silver clusters studied by trapped-ion spectroscopy |
| 3. 学会等名 The 15th DAE-BRNS Biennial Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP-2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Evolution of optical responses of free silver clusters as a function of size |
| 3. 学会等名 The 76th Fujihara Seminar, International Workshop on Designer Nanocluster Materials -From Gas Phase to Condensed Phase- (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Terasaki, K. Minamikawa, and M. Arakawa |
| 2. 発表標題 Electron counting in cationic and anionic silver clusters doped with a transition-metal atom |
| 3. 学会等名 The 10th Conference of the Asian Consortium on Computational Materials Science (ACCMS-10) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Transition-metal-doped silver clusters: cations and anions |
| 3. 学会等名 Gordon Research Conference on Gaseous Ions: Structures, Energetics and Reactions (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Terasaki, K. Minamikawa, M. Horioka, and M. Arakawa |
| 2. 発表標題 Finite-size effect in dilute magnetic alloy of silver in the small cluster regime |
| 3. 学会等名 7th Interdisciplinary Symposium on Materials Chemistry (ISMC-2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Electronic structures of size-selected metal clusters studied by optical and chemical probes |
| 3. 学会等名 Asian Symposium on Nanoscience and Nanotechnology 2018 “Fundamentals and Applications of Nanoclusters and Nanoparticles” (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 堀尾琢哉、南川賢人、西里 将、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 CWレーザー光電子画像観測法による超原子軌道イメージング |
| 3. 学会等名 レーザー学会 第42回年次大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 孤立金属化合物クラスターの生成・分析における分光測定の利用 |
| 3. 学会等名 第79回分析化学討論会 スペクトロスコピー分析化学とその展開（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 レーザー・放射光とイオントラップ技術による孤立金属クラスターの分光 |
| 3. 学会等名 日本分光学会 中国四国支部 平成30年度年次講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Kono, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Cluster-growth analysis by optical emission spectroscopy in a magnetron-sputtering metal-cluster source |
| 3. 学会等名 Pacifichem: Advanced Functional Clusters and Nanostructured Materials (Symposium #416) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Handa, T. Horio, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Reflectron time-of-flight mass spectrometer with improved convergence of an ion beam |
| 3. 学会等名 The 29th (XXIX) International Symposium on Molecular Beams (ISMB2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 S. Kono, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Formation of metal cluster ion beams investigated by mass spectrometry and optical emission spectroscopy |
| 3. 学会等名 The 29th (XXIX) International Symposium on Molecular Beams (ISMB2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Horio, K. Minamikawa, T. Nishizato, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Photoelectron imaging of metal cluster anions using a continuous wave laser source |
| 3. 学会等名 第36回化学反応討論会 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Horio, S. Fujimoto, S. Kono, M. Arakawa, T. Yasuike, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Emergence of plasmonic behavior in free silver clusters, AgN ⁺ , studied by photofragmentation spectroscopy in the size range up to N = 70 |
| 3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 Symposium G-4 Plasmonic Materials: from Fundamentals to Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 S. Kono, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2 . 発表標題 A study on cluster growth in the magnetron-sputtering metal-cluster source by optical emission spectroscopy |
| 3 . 学会等名 Workshop on Advances in Cluster Beam Deposition (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 M. Arakawa, G. Naresh Patwari, and A. Terasaki |
| 2 . 発表標題 Nitridation of tantalum cluster cations by ammonia molecules |
| 3 . 学会等名 Workshop on Advances in Cluster Beam Deposition (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 K. Minamikawa, N. Hayashi, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2 . 発表標題 Exploring electronic and geometric structures of both cationic and anionic transition-metal-doped silver clusters via reaction with dioxygen |
| 3 . 学会等名 The 76th Fujihara Seminar, International Workshop on Designer Nanocluster Materials -From Gas Phase to Condensed Phase- (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 S. Kono, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2 . 発表標題 Cluster growth in the magnetron-sputtering cluster source studied by optical emission spectroscopy |
| 3 . 学会等名 The 76th Fujihara Seminar, International Workshop on Designer Nanocluster Materials -From Gas Phase to Condensed Phase- (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Minamikawa, M. Horioka, T. Kawano, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Exploring electronic structures of transition-metal-doped silver clusters: Effect of electron count studied by chemical reaction of cations and anions |
| 3. 学会等名 Nineteenth International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC 19) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Minamikawa, M. Horioka, T. Kawano, M. Arakawa, and A. Terasaki |
| 2. 発表標題 Size-dependent reactivity of transition-metal-doped silver cluster ions: Effects of geometric and electronic structures |
| 3. 学会等名 Asian Symposium on Nanoscience and Nanotechnology 2018 “Fundamentals and Applications of Nanoclusters and Nanoparticles (国際学会) |
| 4. 発表年 2018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 光電子イメージングによる銀クラスター負イオンの超原子軌道の探究 |
| 3. 学会等名 日本化学会第102春季年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河村 駿、河野 聖、荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 サイズ選別銀クラスター正イオンの多光子解離分光：幾何構造の推移に応じたスペクトルの形状変化 |
| 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 飯田岳史、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 飛跡シミュレーションを用いた線形イオントラップ内のイオン分布解析 |
| 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 荒川 雅、堀岡正崇、南川賢人、河野知生、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 銀クラスター正イオン上での一酸化窒素分子の逐次反応：サイズに依存した反応経路 |
| 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 堀尾琢哉、南川賢人、西里 将、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 CWレーザーダイオードを用いた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15回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 南川賢人、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 酸素との反応性を介した遷移金属添加銀クラスター正・負イオンの3d電子の局在/非局在性探究：電子数と幾何構造の効果 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第19回大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 飯田岳史、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 イオン軌道シミュレーションを用いた線形イオントラップ内のイオン密度分布の解析 |
| 3. 学会等名 日本化学会第101春季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河野 聖、河村 駿、森下健介、荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 光解離および光吸収分光による銀クラスター正イオンの構造成長の探索 |
| 3. 学会等名 日本化学会第101春季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 奈穂、南川賢人、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 セリウム添加銀クラスター正イオンの電子構造・幾何構造：酸素との反応性を介したサイズ効果の探究 |
| 3. 学会等名 日本化学会第101春季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 南川賢人、荒川 雅、登野健介、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 酸素との反応性に基づくコバルト添加銀クラスター負イオンの電子構造解析：光電子分光の再解釈 |
| 3. 学会等名 分子科学会オンライン討論会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 奈穂、南川賢人、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 酸素との反応性を介したセリウム添加銀クラスター正イオンの電子構造探究 |
| 3. 学会等名 分子科学会オンライン討論会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河野 聖、荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 銀クラスター正イオンの光吸収分光：2量体から40量体まで |
| 3. 学会等名 分子科学会オンライン討論会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河野 聖、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 マグネトロンスパッタ法での金属クラスター成長：発光分光による解析 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第18回大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 飯田岳史、堀尾琢哉、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 イオン軌道シミュレーションによる線形イオントラップ内のイオン密度分布の解析 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第18回大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 南川賢人、荒川 雅、登野健介、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 コバルト添加銀クラスター負イオンの電子構造：反応性測定に基づく光電子スペクトルの再解析 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第18回大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 南川賢人、荒川 雅、登野健介、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 Electronic structures of cobalt-doped silver cluster anions, AgNCo ⁻ , revisited: refined analysis of photoelectron spectra in light of chemical reactivity |
| 3. 学会等名 日本化学会第100春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 飯田岳史、堀尾琢哉、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 リフレクトロン型飛行時間質量分析計の検出効率向上：イオンビーム集束性能の改善 |
| 3. 学会等名 日本化学会第100春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河野 聖、荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 銀クラスター正イオンの光吸収・解離過程：2-40量体のサイズ依存性 |
| 3. 学会等名 日本化学会第100春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河野 聖、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 マグネトロンスパッタ金属クラスター源の発光分析によるクラスター成長条件の解析 |
| 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 飯田岳史、堀尾琢哉、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 イオンビーム集束性を向上させたリフレクトロン型飛行時間質量分析計 |
| 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 荒川 雅、堀岡正崇、西川享佑、南川賢人、河野知生、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 遷移金属を添加した銀クラスター正イオンと一酸化窒素分子との反応：サイズと添加元素に依存した反応経路 |
| 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 南川賢人、林 奈穂、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 化学反応性を指標とした遷移金属添加銀クラスター正・負イオンの電子構造研究：s-d相互作用への電子数と幾何構造の効果 |
| 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 堀岡正崇、荒川 雅、南川賢人、西川享佑、河野知生、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 遷移金属添加銀クラスター正イオンと一酸化窒素分子との反応：サイズと添加元素に依存した反応経路の変化 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第17回大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 飯田岳史、堀尾琢哉、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 イオンビーム集束性能を向上させたリフレクトロン型飛行時間質量分析計の設計と実証 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第17回大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤本周平、河野 聖、荒川 雅、堀尾琢哉、安池智一、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 光吸収による電子の集団励起：銀クラスター40-70量体 |
| 3. 学会等名 日本化学会第99春季年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 堀岡正崇、西川享佑、南川賢人、河野知生、西浦 隼、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 遷移金属原子を添加した銀クラスター正イオンと一酸化窒素分子との反応：サイズおよび添加元素による反応経路と生成物の変化 |
| 3. 学会等名 日本化学会第99春季年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 南川賢人、堀岡正崇、河野知生、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 酸素分子との反応性を介した遷移金属添加銀クラスターイオンAgNM+/- の電子構造研究：18電子系における電子構造と幾何構造の相関 |
| 3. 学会等名 日本化学会第99春季年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 南川賢人、堀岡正崇、河野知生、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 酸素との化学反応性を介した遷移金属添加銀クラスターイオンの電子構造研究 |
| 3. 学会等名 第12回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 堀岡正崇、西川享佑、南川賢人、河野知生、西浦 隼、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 遷移金属原子を添加した銀クラスター正イオンAgNM+ (M = Sc-Ni) と一酸化窒素分子との反応：添加元素による反応性・生成物の変化 |
| 3. 学会等名 第12回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 藤本周平、河野 聖、荒川 雅、安池智一、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 TD-DFT計算による銀クラスター正イオンの電子励起における集団性の評価 |
| 3. 学会等名 第12回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 飯田岳史、荒川 雅、堀尾琢哉、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 イオンビームの空間集束性を高めるリフレクトロン型飛行時間質量分析計の設計 |
| 3. 学会等名 第12回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河野 聖、藤本周平、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 マグネトロンスパッタ法におけるクラスター生成領域の発光スペクトル測定とその解析 |
| 3. 学会等名 第12回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 南川賢人、堀岡正崇、河野知生、荒川 雅、寺寄 亨 |
| 2. 発表標題 サイズ選別したコバルト添加銀クラスター負イオンAgNCo ⁻ と酸素との反応性 |
| 3. 学会等名 ナノ学会第16回大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学大学院理学研究院化学部門量子化学研究室ホームページ
http://www.scc.kyushu-u.ac.jp/quantum/index_j.php

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 |
|-------|---|-------------------------------|----|
| 研究分担者 | 安池 智一 (Yasuike Tomokazu) (10419856) | 放送大学・教養学部・教授 (32508) | |
| 研究分担者 | 堀尾 琢哉 (Horio Takuya) (40443022) | 九州大学・理学研究院・准教授 (17102) | |
| 研究分担者 | 荒川 雅 (Arakawa Masashi) (10610264) | 九州大学・理学研究院・助教 (17102) | |

| | 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 |
|-------|-----------------------------|---------------------------------|----|
| 研究協力者 | 南川 賢人 (Minamikawa Kento) | 九州大学・大学院理学府・博士課程 (17102) | |
| 研究協力者 | 河野 聖 (Kono Satoshi) | 九州大学・大学院理学府・博士課程 (17102) | |
| 研究協力者 | 飯田 岳史 (Handa Takefumi) | 九州大学・大学院理学府・博士課程 (17102) | |

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 |
|---------|---------|
| | |