

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05185

研究課題名(和文) 金属クラスターへの希土類元素の添加効果：極微金属中でのs-f電子間相互作用の解明

研究課題名(英文) Doping effect of rare-earth elements to metal clusters: s-f electron interactions in ultrafine metals

研究代表者

荒川 雅 (Arakawa, Masashi)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：10610264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：気相のランタノイド添加銀クラスターと酸素との反応性をプローブとして、量子化された状態密度を持つ有限個の伝導s電子と局在f電子との相互作用を探究した。サイズ選別したランタノイド添加銀クラスター正イオンをイオントラップに捕捉し、反応時間を変えながら酸素との反応を観測した。反応物と生成物の強度の時間変化から反応経路とカイネティクスを導出し、クラスターの電子構造を探究した。例えばセリウム添加では銀原子数16、サマリウム添加では銀原子数15のクラスターが反応性極小を示し、電子閉殻の形成が示唆された。d電子は非局在化して閉殻に寄与する一方、f電子の非局在は電子閉殻構造に寄与しないことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非磁性金属に微量の磁性金属を含む希薄合金において、磁性不純物に局在したd、f電子と非磁性金属のs電子との相互作用によるスピン消失に起因した近藤効果が知られ、特に磁性金属として希土類元素を含む場合には、3d遷移金属の化合物にはない特異な性質を示す物質が数多く見出されてきた。ところが、極微小金属中で量子化された状態密度を持つ有限個の伝導s電子と局在f電子との相互作用は未解明であった。金属クラスター中の有限個の伝導電子と局在f電子との相互作用を探究した本成果は、サブナノスケールの極微小物質を扱う次世代のナノ物質科学にとって非常に有意義である。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at investigation of interaction between itinerant s electrons and localized d and f electrons with quantized density of states in the finite regime. We measured reaction kinetics of size-selected gas-phase lanthanide-doped silver clusters toward oxygen to probe their electronic structures. Our results revealed that d electrons of the dopant delocalize to contribute to electronic shell closure with s electrons, whereas f electrons remain localized not to contribute to the shell closure.

研究分野：物理化学

キーワード：金属クラスター s-f電子相互作用 s-d電子相互作用 電子局在/非局在 ランタノイド 超原子 反応経路 反応カイネティクス

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非磁性の金属 (Cu, Ag, Au など) に極微量の磁性金属 (Mn, Fe, Co など) を含む希薄合金では、ある温度以下で電気抵抗が上昇に転じる抵抗極小現象をはじめ、純金属では見られない様々な現象が観測される。これらの現象は、磁性不純物に局在した 3d 電子が非磁性金属の伝導電子 (s 電子) と相互作用してスピンの消失することに起因しており、近藤効果[1]と呼ばれている。非磁性金属中の遍歴 s 電子と磁性不純物上の局在電子との相互作用についての理解は、非磁性金属の基板表面に磁性原子を吸着した系の研究により飛躍的に進歩を遂げてきた[2]。これらの研究で扱われるバルク金属には無限個の自由電子が含まれ、フェルミエネルギー近傍で連続的な状態密度を取っている。一方で、3d, 4f 電子を取り巻く s 電子の広がり (近藤雲) よりも小さなナノスケールの物質中での相互作用がどのように働くかは自明ではない。特に、磁性不純物として希土類元素を含む場合には、4f 電子の強い局在性から、s-f 電子間相互作用だけでなく、f 電子間同士の相互作用が競合すると考えられるが、これらの相互作用がどのように働くかは未開拓である。3d 磁性原子については、これまでに金や銀のクラスターに Co などが 1 個添加された合金クラスターの魔法数が調べられ、価電子数に依存して d 電子が局在/非局在の状態を変えることが報告されている[3,4]。ところが、非フェルミ液体や超伝導など、3d 遷移金属の化合物にはない特異な性質の要因となる f 電子に関する研究は、全く報告されていない。ナノスケールの物質中での量子化された状態密度を持つ有限個の伝導電子と局在 f 電子との相互作用の解明が望まれている。

2. 研究の目的

クラスターの構成原子数 (サイズ) と組成により、系に含まれる価電子数を厳密に制御することができる。また、我々はこれまでに、電子構造をクラスターの反応性によりプローブできることを見出してきた[5]。反応性をプローブとすれば、正イオンのみならず、負イオンについても研究可能であり、磁性電子の局在/非局在挙動に対する価電子数の重要性を体系的に探究することが可能となる。本研究では、以上の実験技術に基づき、希土類元素を添加した非磁性金属クラスターの酸素などの分子との反応観測により、ナノスケールの物質中での s-f 電子間相互作用を探究する。

3. 研究の方法

非磁性金属には価電子 (遍歴 s 電子) を 1 個持つ Ag や 3 個持つ Al を選び、マグネトロンスパッタ法を用いて、数個か百個程度の宿主非磁性金属原子に希土類磁性原子を添加したクラスターを真空中に生成した。四重極質量選別器で原子数を厳密に制御してイオントラップ中に任意の時間捕捉し、酸素や一酸化窒素などの分子との反応を観測した。反応物の減少と生成イオン種の同定、収量の分析は、第 2 の四重極質量分析計もしくは飛行時間質量分析計[6]で行った。クラスター中では、s 電子の軌道は離散的な電子殻を形成する。希土類元素の 4f, 5d, 6s 軌道はエネルギー的に近接しているが、強く局在した 4f 電子が非局在化してクラスターの電子殻に参加するか否かに着目した。宿主金属原子数によりクラスター内の価電子数を制御すると、宿主金属上の s 電子と希土類原子上の 4f 電子との間の相互作用が変調を受けると予測される。一般に、酸素分子との反応性が開殻電子系では高く、閉殻電子系では低い。このことを利用して、反応性の観測により、クラスター内の価電子数に応じて 4f 電子が s 電子の形成する電子殻に参加するか否かの挙動に迫った。

4. 研究成果

(1) 銀クラスター正イオンおよび 3d 遷移金属元素添加銀クラスター正イオンと一酸化窒素分子との反応

まず、銀クラスターの成長過程を発光分析法で調べ、クラスター生成条件を適切に制御することで、広いサイズ領域での実験が可能となった (Kono et al., *Chem. Lett.* **48**, 1537, 2019)。この知見を活かして銀クラスター正イオン Ag_n^+ および 3d 遷移金属添加銀クラスター正イオン Ag_nM^+ ($M = Sc-Ni$) を生成し、一酸化窒素分子との反応を観測した。反応物および生成物の同定と収量の測定には、独自の方法で高感度化を実現した飛行時間型質量分析計[6]を用いた。

添加原子を含まない純粋な銀クラスターの正イオンの反応では、一酸化窒素分子との逐次反応の結果、生成イオン種として、主に酸化物 ($Ag_nO(NO_2)_{m-1}^+$) と NO_2 付加物 ($Ag_n(NO_2)_m^+$) (m

≥ 1) が観測された。イオントラップでの捕捉時間を精密に制御した実験で、反応物と生成イオン種の時間変化を測定して反応カインेटイクスの解析を行い、これらイオン種が生成する経路を求めた。その結果、サイズに応じて二通りの反応経路が存在することを見出した。 $n = 4, 6, 9$ では、中間体 $\text{Ag}_n\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ を経由して $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)_m^+$ が生成した。つまり、 $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ と NO 二分子との反応で生じた $\text{Ag}_n\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$ が、さらにもう一分子の NO と反応して $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)_m^+$ が生成する。これは、銀表面での反応と類似している。一方、 $n = 7, 8, 10-12, 15$ では、 Ag_nO^+ と $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)^+$ が Ag_n^+ から同時に生成し、さらに NO_2 の逐次的な付加により $\text{Ag}_n\text{O}(\text{NO}_2)_{m-1}^+$, $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)_m^+$ ($m \geq 2$) が生成した。このことから、銀クラスター上で不均化反応が起こり、三分子の NO から $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)^+$ と N_2O が生じたことが示唆された (Arakawa et al., *J. Phys. Chem. C* **124**, 26881, 2020)。クラスター上の狭い領域に複数の一酸化窒素分子が吸着することによる、クラスター特有の反応であると考えられる。

遷移金属元素を一原子添加した場合には、添加原子が内包されない小さなサイズでは、添加原子が反応サイトとなり、元素種によって異なる反応が観測された。前期遷移金属 $M = \text{Sc}-\text{V}$ を添加した場合には、酸化物 Ag_nMO_m^+ が生じ、後期遷移金属 $M = \text{Cr}-\text{Ni}$ では $\text{Ag}_n\text{M}(\text{NO})_m^+$ が生じた。これら生成物は、反応サイトとなる遷移金属の性質を反映している。サイズが大きくなり、添加原子が銀原子に囲われ始めると、 $M = \text{Sc}-\text{Ni}$ のいずれにおいても、NO が一分子付加した $\text{Ag}_n\text{M}(\text{NO})^+$ が生成した。添加原子に二分子以上の NO がアクセスできなくなったことを示唆する結果である。さらに大きなサイズでは、添加原子が完全に内包されて銀原子が反応サイトとなり、添加元素種に依らず $\text{Ag}_n(\text{NO}_2)_m^+$ が生成した。

ここで、クラスターの反応性に着目する。図 1 に Ag_nSc^+ と NO との反応における反応速度係数のサイズ依存性を示す。 $n = 16$ で反応性極小が観測され、銀の 5s 電子 16 個、Sc の 3d¹ 4s² と正電荷による 18 電子閉殻の形成が示唆された。同様の反応性極小は、 $M = \text{Ti}, \text{V}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}$ でも観測された (Arakawa et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23**, 22497, 2021)。

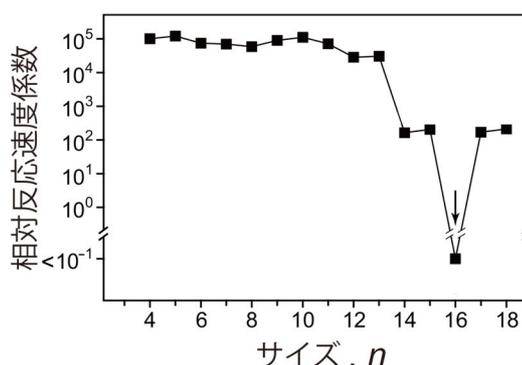


図 1. Ag_nSc^+ と NO との反応の速度係数のサイズ依存性。 Ag_8^+ の O_2 との反応速度 $(6 \pm 2) \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ を基準に相対値をプロットした。

(2) 希土類添加銀クラスター正イオンと酸素分子との反応

図 2 に、セリウム添加銀クラスター正イオンおよびサマリウム添加銀クラスター正イオンと酸素との反応性を示した。銀クラスターにセリウム、サマリウムのどちらを添加した場合でも、小さなサイズでは添加のない銀クラスターに比べて 5 桁程度高い反応性を示したが、あるサイズで反応性が急激に減少した。反応性の低下と同時に生成物が変化することを見出した。つまり、小さなサイズでは、 O_2 が Ce もしくは Sm と結合した解離を伴う生成物が主体であるのに対し、大きなサイズでは解離を伴わない酸化物が生成した。この結果は、ランタノイドの内包により反応サイトがランタノイドから銀へと変化したことを示す。

さらに、低い反応性を示した大きなサイズの中で、セリウム添加では銀原子数 16、サマリウム添加では銀原子数 15 のクラスターが反応性極小を示し、電子閉殻の形成が示唆された。つまり、 $\text{Ag}_{16}\text{Ce}^+$ では銀の 5s 電子 16 個、Ce の 5d¹ 6s² と正電荷、 $\text{Ag}_{15}\text{Sm}^+$ では銀の 5s 電子 16 個、Sm の 6s² と正電荷によって 18 電子閉殻が形成されたと考えられる。以上の結果は、d 電子は銀の s 電子と相互作用して閉殻に寄与する一方、f 電子は電子閉殻構造に寄与しないことを示唆する。強く局在

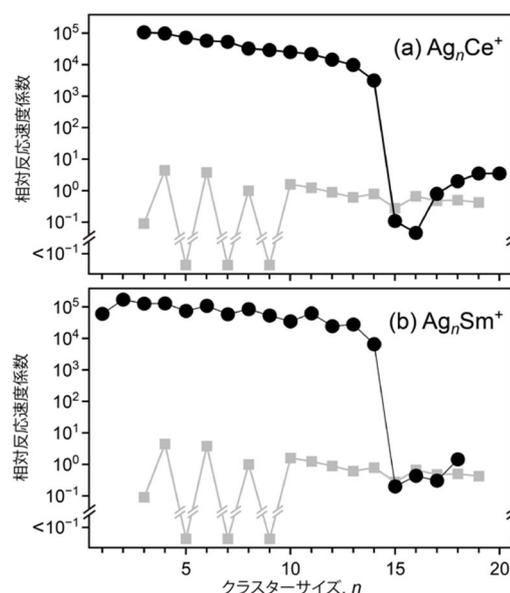
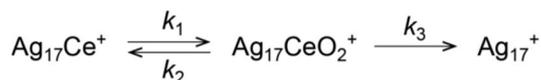


図 2. (a) Ag_nCe^+ , (b) Ag_nSm^+ と O_2 との反応の速度係数のサイズ依存性。 Ag_8^+ の O_2 との反応速度 $(6 \pm 2) \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ を基準に相対値をプロットした。 Ag_n^+ の O_2 との反応をグレーで示した。

した 4f 電子は、O₂ との反応にも寄与しないと考
えられる。

生成物の解析に加えてカイネティクスの詳し
い解析から、セリウムを添加した場合には、サイ
ズ増加に伴って内包構造に変化したクラスター
が、 $n \geq 17$ で再びセリウム原子が露出した構造を
取ることを見出した。図 3 に、Ag₁₇Ce⁺ と O₂ との
反応カイネティクスを示す。実験データを解析
した結果、以下の経路で反応が進行することが
分かった。



ここで、 k_1, k_2, k_3 は各ステップの反応速度定数で
ある。 $n = 17$ は内包から露出に変化する過渡的な
サイズであり、部分的に露出する Ce 原子が反応
サイトとなり、O₂ 付加と脱離の平衡反応が起こ
ると考察した。図 4 に総括したとおり、サイ
ズとともに変化する Ag_nCe⁺ の幾何構造、電子構造
にともなって、反応サイトと反応性が変化する
様子を捉えた (Arakawa et al., *J. Phys. Chem. A* **126**,
6920, 2022)。

(3) まとめ

以上のように、計画に沿って研究を推進した。主要な成果として、銀クラスター上で 3 分子の NO から NO₂ と N₂O を生ずる不均化反応の発見、添加原子の内包と s-d 相互作用により電子閉殻構造を形成した新たな安定化学種の発見が挙げられる。特に、局在性の強い希土類元素の f 電子は、電子閉殻に寄与しないことを見出した。これらの成果は、報告した論文のうち Arakawa et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23**, 22947 (2021) が英国王立化学会 PCCP Hot Article に選出され、また、国際会議での招待講演を 4 件行うなど、国内外で高く評価された。

<参考文献>

[1] Kondo, *Prog. Theor. Phys.* **32**, 37 (1964). [2] Madhavan et al., *Science* **280**, 567 (1998). [3] Neukermans et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 033401 (2003). [4] Janssens et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 113401 (2005). [5] 代表論文: Arakawa et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 13974 (2018); Sarugaku, Arakawa, Terasaki et al., *Chem. Lett.* **46**, 385 (2016). [6] Handa, Horio, Arakawa, and Terasaki, *Int. J. Mass Spectrosc.* **451**, 116311 (2020).

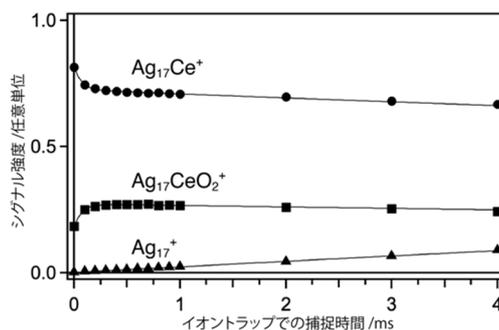


図 3. Ag₁₇Ce⁺ と O₂ との反応カイネティクス。

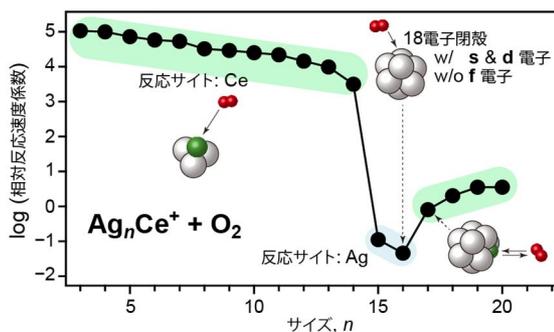


図 4. Ag_nCe⁺ の幾何構造、電子構造の変化にともなって O₂ との反応サイトと反応性が変化する様子。

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 K. Minamikawa, M. Arakawa, K. Tono, and A. Terasaki	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 2021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 K. Minamikawa, M. Arakawa, K. Tono, and A. Terasaki	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
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 M. Arakawa, M. Horioka, K. Minamikawa, T. Kawano, and A. Terasaki	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 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 M. Arakawa, D. Okada, S. Kono, and A. Terasaki	4. 巻 1242
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 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 S. Sarugaku, M. Arakawa, T. Kawano, and A. 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 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 -

1. 著者名 T. Ito, M. Arakawa, Y. Taniguchi, and A. Terasaki	4. 巻 233
2. 論文標題 Adsorption kinetics of nitrogen molecules on size-selected silver cluster cations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Z. Phys. Chem.	6. 最初と最後の頁 759-770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/zpch-2019-1373	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 S. Kono, M. Arakawa, and A. Terasaki	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 Arakawa Masashi, Hayashi Naho, Minamikawa Kento, Nishizato Tasuku, Terasaki Akira	4. 巻 126
2. 論文標題 Exploring s-d, s-f, and d-f Electron Interactions in AgnCe+ and AgnSm+ by Chemical Reaction toward O2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 6920-6926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.2c04941	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17件(うち招待講演 5件/うち国際学会 5件)

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 南川賢人, 猿楽峻, 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協同効果
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 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 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 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 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 荒川雅, 岡田大知, 寺寄亨
2. 発表標題 コバルトクラスター正イオン上での一酸化炭素-水素分子間反応
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 M. Arakawa and A. Terasaki
2. 発表標題 Elementary processes in chemical evolution studied by size-selected cluster chemistry
3. 学会等名 The 23rd East Asian Workshop on Chemical Dynamics (EAWCD) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Arakawa and A. Terasaki
2. 発表標題 Reaction of gas-phase metal and mineral clusters with H ₂ O, CO, and H ₂ molecules related to chemistry in space
3. 学会等名 International Congress on Pure & Applied Chemistry Yangon (ICPAC Yangon 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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活用, 第79回分析化学討論会
3. 学会等名 第79回分析化学討論会 (招待講演)
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 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 K. Minamikawa, M. Arakawa, K. Tono, A. Terasaki
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 The 100th CSJ Annual Meeting, Noda
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Minamikawa, N. Hayashi, M. Arakawa, 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 南川賢人, 林奈穂, 荒川雅, 寺崎亨
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 M. Arakawa, M. Horioka, K. Minamikawa, T. Kawano, and A. Terasaki
2. 発表標題 Reaction kinetics of nitric oxide molecules on silver cluster cations: Size-dependent reaction pathways
3. 学会等名 International Congress on Pure & Applied Chemistry Kota Kinabalu (ICPAC Kota Kinabalu 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Arakawa, M. Horioka, K. Minamikawa, T. Kawano, and A. Terasaki
2. 発表標題 Reaction kinetics of NO on Agn+ and AgnM+ (M = Sc-Ni): Size- and dopant-dependent reaction pathways
3. 学会等名 The Symposium on Size-Selected Clusters S3C, Davos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者ウェブサイト http://www.scc.kyushu-u.ac.jp/quantum/members/Arakawa/work.html</p>

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