

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14433

研究課題名(和文) 気相多元素クラスターの熱的条件下における反応性評価と反応機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of Reactivity and Reaction Mechanisms of Gas-phase Multi-elemental Clusters under Thermal Conditions

研究代表者

永田 利明 (Nagata, Toshiaki)

東北大学・理学研究科・JSPS特別研究員(PD)

研究者番号：80783373

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)：金属や金属酸化物の気相クラスターを研究対象とし、熱的条件下における気体分子との反応について実験及び理論計算により研究した。真空装置内でレーザー蒸発法によりクラスターを生成し、反応セル内で気体分子と反応させた後、気相昇温脱離法やイオン移動度質量分析法を用いた測定を行った。これにより、特にクラスター上に付加した気体分子について、結合の強さ(エネルギー)や付加形態(幾何構造)についての情報が得られる。実験と並行して量子化学計算を行い、クラスターと分子が反応した際の具体的な構造について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属や金属酸化物の気相クラスターは触媒反応のモデル系として研究される。従来の実験研究はクラスターが真空中に孤立した断熱条件下での反応研究が主であったが、これは実際の触媒反応の環境とは大きく異なる。本研究では、反応で生成したエネルギーが速やかに拡散して熱平衡に達するような熱的条件下での反応実験を展開することで、よりリアルなモデル系として気相クラスターを扱う研究を行った。また、気相クラスターの反応機構について、これまでは理論計算に頼る研究が多く為されてきたが、本研究では実験科学的に反応過程のエネルギーや構造の情報を取得する手法を進展させた。

研究成果の概要(英文)：Chemical reactions of gas-phase metal and metal oxide clusters with gaseous molecules were studied experimentally and computationally. The clusters were generated by laser vaporization method in a vacuum chamber and then reacted with gaseous molecules using a reaction cell. The resulted species were analyzed by gas-phase temperature programmed desorption and ion mobility mass spectrometry, which provided information of binding energies and forms of the molecules adsorbed on the clusters. Geometrical structures of the clusters after the reactions were discussed by comparing the experimental results with quantum chemical calculations.

研究分野：クラスター・ナノ粒子の物理化学

キーワード：気相クラスター 気相反応 反応機構 幾何構造 質量分析 イオン移動度分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気相クラスターは不均一系触媒表面の化学反応のモデル系として研究される。従来の研究は主にクラスターが真空中に孤立した実験条件であるが、この条件下ではクラスターと気体分子の反応で生じたエネルギーが系内に長時間留まり、後続の反応を誘発する。一方、実用される固体表面での触媒反応では、反応時のエネルギーは周囲に拡散し、熱平衡に達すると考えられる。したがって気相クラスターを触媒反応のモデル系として扱うためには、孤立条件ではなく熱平衡を保ちながら現象を観測することが望ましい。

熱平衡下でのクラスターのエネルギー制御手法は発展途上であるが、研究代表者らはこれまで、熱的条件下でクラスターの温度を制御し、反応の活性化エネルギーを測定する手法「気相昇温脱離法」を開発した。この手法による研究から、孤立条件下では観測されなかった反応中間体を熱的条件下で観測したうえで、その性質を分析することに成功している。このように、熱的条件下でのクラスター実験により、従来の研究より反応を細かく追跡するとともに、より現実の触媒反応に近い状況で化学反応の知見を得られるようになった。

2. 研究の目的

複合物質からなる触媒のモデル系として多元素クラスターの化学反応の研究が重要と言える。本研究では金属を含む複数の元素からなるクラスターを気相中に生成し、熱的条件下でその反応性を評価することで、元素混合の効果や反応機構を解明する。気相クラスターの手法を用いることで、通常の合成では原子レベルで混合させるのが困難な組み合わせの合金や複合酸化物であってもクラスターの生成、組成の制御、反応性の評価が可能であることから、多元素複合による新物質設計の指針を与える研究を行う。また、気相クラスターにおいて化学反応を原子・分子 1 個単位で区別して観測できることを利用して、素過程に近い化学反応を観測し、反応機構の解明へ繋げていく。特に、気相クラスターにおける酸化還元反応を検討することで、金属酸化物や金属ナノ粒子からなる酸化還元触媒の動作原理の解明や、新規高機能触媒の設計に資する研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 多元素クラスターの構成要素となる金属クラスター・金属酸化物クラスターの反応解析

多元素クラスターの反応解析に向けて、まずその構成要素となる単純な金属クラスターや金属酸化物クラスターの反応解析を行った。クラスターの生成は気相中におけるレーザー蒸発法で行い、生成したクラスターに熱的条件下で気体分子を反応させた。反応前後のクラスターは質量分析法やイオン移動度質量分析法により検出・分析した。実験と並行して量子化学計算を行い、反応実験やイオン移動度の測定結果と比較することで、クラスターのエネルギーや幾何構造を反応座標に沿う形で明らかとし、より深く化学反応を理解することを目指した。

(2) 2つの金属元素を含む多元素クラスターの生成と反応解析

単純な金属クラスター・金属酸化物クラスターの研究を踏まえ、それらを構成要素の一部に含む多元素クラスターの反応解析を行った。2つの金属元素を含む多元素クラスターを生成するために、レーザー光源と蒸発ターゲットをそれぞれ2つ用いたクラスターイオン源を新規に製作し、安定な観測を行える実験条件を確立した。生成した多元素クラスターに気体分子を反応させ、反応性を解析した。多元素クラスターの研究では質量スペクトルの複雑化が課題となるが、本研究では質量分析とイオン移動度分析を組み合わせた2次元のデータを取得することでこの問題を解決した。反応前後のクラスターの分析は上記(1)と同様の手法で行った。こちらも実験と並行して量子化学計算を行い、クラスターのエネルギーや幾何構造の考察から化学反応の理解を目指した。

4. 研究成果

(1) 金クラスター正イオンと水分子の反応研究

気相昇温脱離法と質量分析法により金クラスター正イオン(Au_n^+)と水分子の反応性を研究した。レーザー蒸発法で気相中に金クラスター正イオンの水和物($\text{Au}_n(\text{H}_2\text{O})^+$)を生成し、He 雰囲気中で加熱する実験手法(気相昇温脱離法)で水分子の脱離過程を観測した(図1左)。解析の結果、水分子の脱離と吸着は可逆的な過程で、平衡とみなせることが分かった。この結果から、金クラスター正イオン上に水が1~4分子付加する際の結合エネルギーを求めた(図1右)。

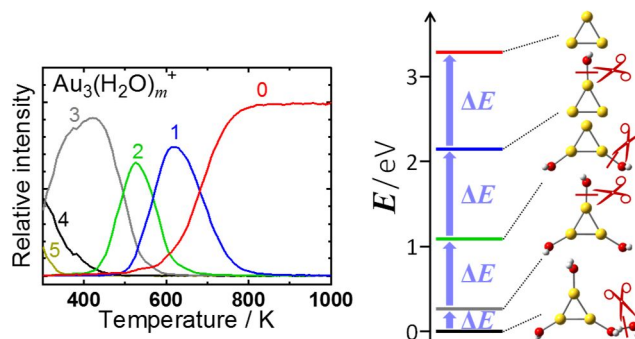


図 1. (左) Au_3^+ 水和物の気相昇温脱離プロファイル。(右)得られた脱離エネルギーと構造。

(2) 酸化セリウムクラスター正イオンと一酸化窒素(NO)分子の反応研究

イオン移動度質量分析法を用いて酸化セリウムクラスター正イオン($Ce_nO_m^+$)と NO 分子の反応性を研究した。気相中に $Ce_nO_m^+$ を生成し、NO と反応させた後、イオンドリフトセルを用いたイオン移動度質量分析を行った。反応により NO が 1 分子付加した酸化セリウムクラスター正イオン($Ce_nO_{2n}(NO)^+$)が生成したものの、これを電場で加速してイオンドリフトセルへ入射すると解離が起き、 $Ce_nO_{2n-1}^+$ へと変化した。入射エネルギーによって解離する割合は変化し、実験室系で 30 eV 以下の入射エネルギーにおいては $Ce_nO_{2n}(NO)^+$ の組成を保ったままイオン移動度質量分析を行うことができた。この測定結果から各イオンの衝突断面積を求め、量子化学計算から求めた各候補構造の衝突断面積と比較検討することで、NO の付加形態を明らかにした。その結果、NO 分子とクラスター上の O 原子が反応して NO_2 分子が形成されつつある構造が示唆された(図 2)。

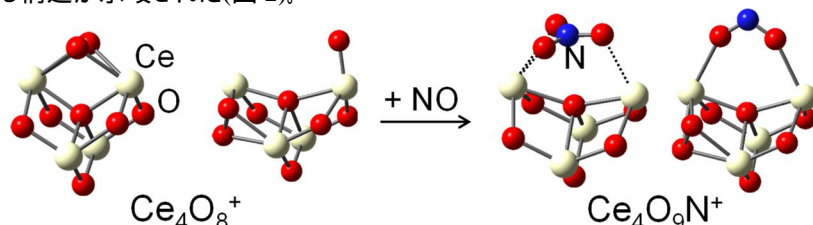


図 2. $Ce_4O_8^+ + NO$ の反応前後の構造.

(3) 金・酸化セリウム複合クラスター正イオンと一酸化炭素(CO)分子の反応研究

酸化セリウムクラスター正イオン($Ce_nO_{2n}^+$)をベースとして、Au 原子を組み合わせた多元素クラスター $Au_mCe_nO_{2n}^+$ について CO 分子との反応を研究した。真空装置内で CeO_2 と Au を同時にレーザー蒸発することで目的のクラスターを得た。続いてクラスターイオン源の下流に設置した反応セルを用いてクラスターを CO と反応させた。まず、従来報告されていたように、 $Au_mCe_nO_{2n}^+$ に CO 分子が付加する反応が確認された。ここで生成した CO 付加クラスター $Au_mCe_nO_{2n}(CO)^+$ について、CO の付加形態を調べるためにイオンドリフトセルを用いたイオン移動度質量分析を行った。イオン移動度質量分析の結果と量子化学計算から、CO 分子は Au 原子上に付加していること、一部の組成のクラスターにおいてはこの際に結合の組み換えが起きることが示唆された(図 3)。

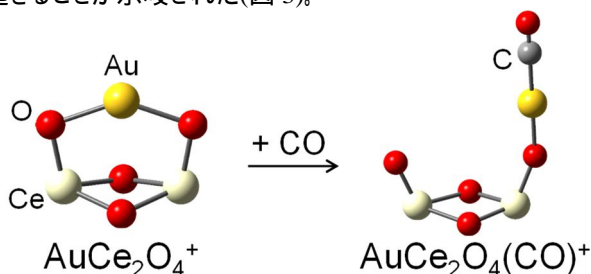


図 3. $AuCe_2O_4^+ + CO$ の反応前後の構造.

(4) ロジウムクラスター正イオンと一酸化窒素(NO)分子の反応研究

ロジウムクラスター正イオン(Rh_n^+)への NO 分子の付加反応について、クラスター上の NO 分子の付加形態を研究した。イオン移動度質量分析法を用いて反応前後のクラスターの構造を求めることを目指した。レーザー蒸発法で Rh_n^+ クラスターを生成し、NO 分子と反応させて NO 付加クラスター $Rh_n(NO)_m^+$ を得た。イオン移動度質量分析の結果、 $Rh_n(NO)_m^+$ の衝突断面積は付加した NO 分子数 (m) に対して単調な増加を示した。理論計算との比較から、少なくとも 1 つ目の NO 分子は N-O 結合を保ったままクラスター上に付加していると示唆された。

(5) 酸化マンガンクラスター正イオンと一酸化炭素(CO)分子の反応研究

酸化マンガンクラスター正イオン($Mn_nO_m^+$)と CO 分子の反応について、反応様式と速度定数の決定を目指して研究した。 $Mn_nO_m^+$ クラスターは真空装置内で He キャリアガスに O_2 を混ぜたうえで Mn をレーザー蒸発することで生成した。これをパルス電場で CO/He を満たしたイオンドリフトセルに入射し、CO と反応させた。その後クラスターは飛行時間型質量分析計で検出・同定した。反応場としてイオンドリフトセルを用いたことで、反応時間と反応ガスの分子数密度を正確に見積もることができ、熱的条件下での反応速度定数を確度良く求められる。実験の結果、酸化マンガンクラスターへ CO 分子が付加する反応が観測された。この反応の速度定数を算出するために、CO 分子の数密度を変化させた反応実験を継続している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryohei Tomihara, Kiichirou Koyasu, Toshiaki Nagata, Jenna W. J. Wu, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu, Tatsuya Tsukuda	4. 巻 123
2. 論文標題 Structural Evolution of Iridium Oxide Cluster Anions Ir_nO_m^- ($n = 5-8$) with Sequential Oxidation: Binding Mode of O Atoms and Ir Framework	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15301 ~ 15306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b02935	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 Toshiaki Nagata, Jenna W. J. Wu, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu	4. 巻 123
2. 論文標題 Geometrical Structures of Gas-Phase Cerium Oxide Cluster Cations Studied by Ion Mobility Mass Spectrometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16641 ~ 16650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b01378	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. Abdul Latif, Jenna W. J. Wu, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu	4. 巻 123
2. 論文標題 Compositions and Isomer Separation of Palladium Oxide Cluster Cations Studied by Ion Mobility Mass Spectrometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 17580 ~ 17587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b03750	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 該当する
1. 著者名 M. Abdul Latif, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu	4. 巻 124
2. 論文標題 Structure Assignment and Separation of Isomers of Palladium Oxide Cluster Anions Studied by Ion Mobility Mass Spectrometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9604 ~ 9610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c01847	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 該当する

1. 著者名 Toshiaki Nagata, Satoshi Kudoh, Ken Miyajima, Joost M. Bakker, Fumitaka Mafune	4. 巻 122
2. 論文標題 Adsorption of Multiple NO Molecules on Rh _n ⁺ (n = 6, 7) Investigated by Infrared Multiple Photon Dissociation Spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 22884 ~ 22891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b04729	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 該当する

1. 著者名 Fumitaka Mafune, Kohei Koyama, Toshiaki Nagata, Satoshi Kudoh, Tomokazu Yasuike, Ken Miyajima, Douwe M. M. Huitema, Valeriy Chernyy, Joost M. Bakker	4. 巻 123
2. 論文標題 Structures of Rhodium Oxide Cluster Cations Rh ₇₀ ^{m+} (m = 4-7, 12, 14) Revealed by Infrared Multiple Photon Dissociation Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 5964 ~ 5971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b11068	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 該当する

1. 著者名 Motoyoshi Nakano, Yudai Ishimura, Riki Hotta, Daiki Hebiguchi, Toshiaki Nagata, Fuminori Misaizu	4. 巻 32
2. 論文標題 Structures of stoichiometric sodium oxide cluster cations studied by ion mobility mass spectrometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chinese Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 193 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1674-0068/cjcp1812295	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 Daigo Masuzaki, Toshiaki Nagata, Fumitaka Mafune	4. 巻 121
2. 論文標題 Oxygen Release from Cationic Niobium-Vanadium Oxide Clusters, NbnVmO _k ⁺ , Revealed by Gas Phase Thermal Desorption Spectrometry and Density Functional Theory Calculations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 3864 ~ 3870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.7b01961	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 Toshiaki Nagata, Fumitaka Mafune	4. 巻 121
2. 論文標題 Thermal Analysis of Hydrated Gold Cluster Cations in the Gas Phase	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16291 ~ 16299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b04119	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 Toshiaki Nagata, Kohei Koyama, Satoshi Kudoh, Ken Miyajima, Joost M. Bakker, Fumitaka Mafune	4. 巻 121
2. 論文標題 Adsorption Forms of NO on Rh _n ⁺ (n = 6-16) Revealed by Infrared Multiple Photon Dissociation Spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 27417 ~ 27426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b08097	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 該当する

1. 著者名 Fumitaka Mafune, Daigo Masuzaki, Toshiaki Nagata	4. 巻 61
2. 論文標題 Reduction Site in Ce _n VmO _k ⁺ Revealed by Gas Phase Thermal Desorption Spectrometry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Topics in Catalysis	6. 最初と最後の頁 42 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11244-017-0862-5	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24件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 永田 利明
2. 発表標題 酸化セリウムを基本とした多元素クラスターイオンの構造研究
3. 学会等名 第8回イオン移動度研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田 力, 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 塩化ナトリウムクラスターイオンの構造及び臭化物イオン取り込み現象の研究
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 Mohammad Abdul Latif, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Structure assignment and separation of isomers of palladium oxide cluster anions studied by ion mobility mass spectrometry
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 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法の多元素クラスターイオンへの展開
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 小安 喜一郎, 富原 良平, 永田 利明, Jenna W. J. Wu, 中野 元善, 大下 慶次郎, 美齊津 文典, 佃 達哉
2. 発表標題 Irクラスター負イオンの成長および酸化の進行に伴う電子・幾何構造の変化
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 Toshiaki Nagata
2. 発表標題 Geometrical structures of ceria-based composite clusters studied by ion mobility mass spectrometry
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 三竿 洋太郎, 堀田 力, 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法による酸化イットリウムクラスター正イオンの幾何構造の研究
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 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法による酸化マンガンクラスターカチオンの構造研究
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 堀田 力, 永田 利明, 中野 元善, 大下 慶次郎, 美齊津 文典
2. 発表標題 食塩ナノ結晶への不純物臭化物イオン置換による安定性および構造の変化
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 永田 利明, Jenna W. J. Wu, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 NO分子が付加した酸化セリウムクラスターカチオンの構造研究
3. 学会等名 第7回イオン移動度研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Riki Hotta, Jenna W. J. Wu, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Adsorption reaction kinetics of water molecules on sodium fluoride cluster cations
3. 学会等名 第34回化学反応討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumitaka Mafune, Toshiaki Nagata, Kohei Koyama, Satoshi Kudoh, Ken Miyajima, Joost M. Bakker
2. 発表標題 Adsorption Forms of NO on Rh ⁿ⁺ and Rh ⁿ Ta ⁺ Revealed by Infrared Multiple Photon Dissociation
3. 学会等名 International Bunsen Discussion Meeting: Gas Phase Model Systems on Catalysis (GPMC 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiaki Nagata, Jenna W. J. Wu, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Geometrical structures and reactions of cerium oxide cluster cations studied by ion mobility mass spectrometry
3. 学会等名 International Bunsen Discussion Meeting: Gas Phase Model Systems on Catalysis (GPMC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiaki Nagata, Jenna W. J. Wu, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Active site structures of cationic cerium oxide clusters studied by ion mobility mass spectrometry and density functional theory calculations
3. 学会等名 19th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC XIX) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富原 良平, 永田 利明, Jenna W. J. Wu, 小安 喜一郎, 中野 元善, 大下 慶次郎, 美齊津 文典, 佃 達哉
2. 発表標題 Ir酸化物クラスター負イオンのイオン移動度測定：酸化の進行に伴う構造モチーフの転換
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 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法による金・セリア複合クラスター正イオンの構造研究
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 Yudai Ishimura, Riki Hotta, Daiki Hebiguchi, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Structures of sodium oxide cluster ions studied by ion mobility mass spectrometry
3. 学会等名 化学系学協会東北大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法による金・セリア複合クラスター正イオンへのCO付加反応の研究
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 堀田 力, 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 塩化ナトリウムクラスターイオンにおける非岩塩型構造の形成
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 Chang Su, Toshiaki Nagata, Motoyoshi Nakano, Fuminori Misaizu
2. 発表標題 Geometrical structures of rhodium oxide cluster cations studied by ion mobility mass spectrometry
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 Ryohei Tomihara, Toshiaki Nagata, Jenna W. J. Wu, Kiichirou Koyasu, Motoyoshi Nakano, Keijiro Ohshimo, Fuminori Misaizu, Tatsuya Tsukuda
2. 発表標題 Structural transition in the sequential oxidation of iridium cluster anions revealed by ion mobility measurements
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 永田 利明, Jenna W. J. Wu, 中野 元善, 大下 慶次郎, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法によるセリウム酸化物クラスターカチオンの幾何構造の研究
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤 周, 蛇口 大揮, 永田 利明, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法を用いた酸化カルシウムクラスターカチオンの幾何構造の研究
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田 利明, Jenna Wu, 中野 元善, 美齊津 文典
2. 発表標題 イオン移動度質量分析法による酸化セリウムクラスターカチオンのNO分子との化学反応の研究
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究成果の一部についての紹介記事 http://www.chem.tohoku.ac.jp/research/research_outcome/p019.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
--	---------------------------	-----------------------	----