

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03927

研究課題名(和文)非平衡プロセスによる新規多元金属ナノ構造体の作製と高活性電極触媒開発

研究課題名(英文)Preparation of Multinary Alloy Nanostructures via Non-equilibrium Processes and Their Electrocatalytic Activities

研究代表者

鳥本 司 (Tsukasa, Torimoto)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60271029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ粒子を多元素化することにより多様な機能が期待できるものの、構成金属元素が多くなるほど組成や粒子サイズの制御が難しくなる。従って多元金属ナノ粒子の高精度な制御法が開発できれば、ナノ粒子触媒の活性を効率よく向上できる手法となると期待される。そこで本研究では、イオン液体/金属スパッタリング法を用いて、従来の液相化学合成法では作製が困難な非平衡な合金からなるナノ粒子の合成を行った。さらにこれらを電極触媒として用い、その組成が触媒活性に及ぼす影響を明らかにした。この手法では、非平衡な多元ナノ粒子が得られるので、従来とは異なる高機能な電極触媒の開発が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン液体/金属スパッタリング法によって、これまでの液相化学合成法では作製が困難な非平衡な合金からなるナノ粒子が作製できることを実証した。得られた合金ナノ粒子は、組成に依存した電極触媒活性を示し、燃料電池用の触媒開発に大いに役立つと期待される。さらに本手法では三元合金ナノ粒子の合成と精密組成制御が可能であったので、さらに多様な多元合金ナノ粒子の開発にも応用できると期待される。得られる多元合金ナノ粒子は、高活性な電極触媒作製に役立つばかりではなく、半導体光触媒あるいは量子ドット光触媒の助触媒としても有用であり、今後、光-化学エネルギー変換システムの高効率化にも役立つと期待される。

研究成果の概要(英文)：Alloy nanoparticles composed of multinary elements are expected to exhibit various functions. The preparation of multinary alloy nanoparticles, however, has been very difficult with use of conventional methods, because it requires more precise controls of the particle composition and size as the number of constituent metal elements increases. In this study, we used a non-equilibrium process, that is, an ionic liquid/metal sputtering method, to synthesize nanoparticles composed of non-equilibrium alloys, which were difficult to be prepared by conventional chemical methods. Furthermore, we evaluated electrocatalytic activities of obtained multinary alloy nanoparticles for various electrode reactions, in which the activities were strongly dependent on the particle compositions. Since our methods enable to obtain novel non-equilibrium alloy nanoparticles, we can use these to develop novel highly functional electrocatalysts.

研究分野：電気化学

キーワード：合金ナノ粒子 イオン液体 金属スパッタリング 電極触媒

1. 研究開始当初の背景

金属ナノ粒子は、粒子サイズに依存して物理化学特性が大きく変化し、極めて大きな比表面積を持つ。Pt, Pdなどの貴金属ナノ粒子ではこのことを利用して、高活性な触媒および電極触媒の開発が活発に行われている。さらに金属ナノ粒子は、異なる金属との複合化や合金化によって、単一の金属ナノ粒子とは全く異なる性質を示す。例えば、固体高分子形燃料電池の高活性化・低価格化を目指してPt代替触媒の開発が活発に行われており、その1つの方法としてNiやCoなどの遷移金属とPtを合金化させて二元金属ナノ粒子を作製し、Ptの触媒活性を高活性化する方法がある。また、複数の金属元素から構成される合金ナノ粒子あるいはコア@シェル構造複合ナノ粒子は、粒子サイズに加えて、粒子組成によっても物理化学特性が大きく変化する。

現在、合金ナノ粒子や複合金属ナノ粒子の研究では、その作製の容易さから主に二元金属ナノ粒子を対象として行われている。最もよく用いられている液相ナノ粒子合成法は、前駆体となる金属イオンの還元反応を利用したものである。その1つは、対応する2つの異なる金属イオンの同時還元による二元合金ナノ粒子の作製であり、もう1つは、あらかじめ作製した単一金属ナノ粒子の表面でガルバニック置換反応を生じさせて、コア@シェル構造などをもつ二元複合金属ナノ粒子を作製する方法である。しかし多くの場合、液相還元法は平衡プロセスあるいはそれに近いものであるために、前駆体として用いる複数の金属イオン・錯体の還元電位に大きな差がある場合には一方の金属の析出が優先される。従って、均一な二元合金ナノ粒子の合成のためには、液相還元反応の条件を厳格に制御する必要があり、とくに三元素以上の複合ナノ粒子を精度良く合成することは非常に難しい。

一方、私たちは、蒸気圧が極めて低いイオン液体が高真空下でも液体状態を保つことに着目し、減圧下でイオン液体に対して金属スパッタリングを行うことによる新規金属ナノ粒子合成法(イオン液体/金属スパッタリング法)を世界に先駆けて開発した。これは非平衡プロセスであり、従来の化学還元法とは大きく異なり、金属の酸化還元を伴わない。この手法を用いて私たちは、様々な金属ターゲットをスパッタリング蒸着することにより、Au, Ag, Pt, Pdなど金属ナノ粒子を簡便に作製することに成功した。さらに、異なる2種類の金属をイオン液体に同時スパッタ蒸着することで、AuPd, AuPtなどの合金粒子を作製することに成功し、得られた合金ナノ粒子がアルコール酸化反応に対して高い触媒活性を示すことを見出した。イオン液体/金属スパッタリング法の大きな特徴は、(1) 金属スパッタリングによるナノ粒子合成であり、金属の酸化還元反応を利用しない(金属イオンの酸化還元電位に影響されない)こと、(2) 従来の化学還元法のような安定化剤を添加する必要がなく、得られたナノ粒子は未修飾で高活性な粒子表面を持つこと、(3) スパッタ蒸着できる金属に適用することができ、同時スパッタ蒸着によるナノ粒子合成では、多元合金ナノ粒子の構成元素数に原理的な制限がないことである。しかし、三元素以上を含む合金ナノ粒子の合成を、イオン液体/金属スパッタリング法を用いて行った研究例はほとんど報告されていない。

2. 研究の目的

ナノ粒子を多元素化することにより多様な機能が期待できるものの、構成金属元素が多くなるほど組成や粒子サイズの制御が難しくなり、得られるナノ粒子の高品質化が非常に困難になる。従って多元金属ナノ粒子の高精度な制御法が開発できれば、ナノ粒子触媒の活性をさらに向上できると期待される。そこで本研究では、イオン液体/金属スパッタリング法を用いて、従来の液相化学合成法では作製が困難な非平衡な合金からなるナノ粒子の合成を行う。さらに三元素からなる合金ナノ粒子の合成と組成制御を試みる。これらを電極触媒として用い、その組成が触媒活性に及ぼす影響を明らかにする。この手法では、非平衡な多元ナノ粒子が得られるので、従来とは異なる高機能な電極触媒の開発が期待される。

3. 研究の方法

イオン液体として、1-エチル-3-メチルイミダゾリウムテトラフルオロボラート(EMI-BF₄)あるいはN,N-ジエチル-N-メチル-N-(2-メトキシエチル)アンモニウムテトラフルオロボラート(DEME-BF₄)を用いた。これをスライドガラス上に均一に塗布し、異なる金属プレートを所望の面積比で配列させた複合金属ターゲットを数PaのAr雰囲気中でスパッタ蒸着し、イオン液体中に複合金属ナノ粒子を作製した。得られた溶液にカーボンブラック(CB)を添加して加熱することで、複合金属ナノ粒子担持CB触媒(M/CB)を得た。この触媒粒子をグラッシーカーボン電極に担持して作用極とし、種々の電解液中で電極触媒活性を評価した。

4. 研究成果

4-1. PtRu 合金ナノ粒子の作製とメタノール酸化反応に対する電極触媒活性

新規燃料電池開発のための電極触媒探索が活発に行われている。私たちは、直接アルコール型燃料電池触媒の高活性化を目指して PtRu 合金ナノ粒子に着目した。本研究項目では、Pt と Ru プレート交互配列した複合ターゲットを用い、これらをイオン液体(EMI-BF₄)に同時スパッタすることで PtRu 合金ナノ粒子の作製を目指した。PtRu 合金ナノ粒子は直接メタノール燃料型電池の電極触媒として、PtRu 合金ナノ粒子が高いメタノール酸化活性を示すことが知られている。そこで、得られた PtRu 合金ナノ粒子を CB に担持して電極触媒 (PtRu/CB) とし、0.5 M メタノールを含む 0.5 M HClO₄ 水溶液中でサイクリックボルタモグラムを測定することで、メタノール酸化活性に及ぼす PtRu 合金組成の影響を評価した。

PtRu/CB では、直径 1.4 nm の球状 PtRu 粒子が CB 表面に密に担持されていた。粒子サイズはスパッタ後のイオン液体中の金属ナノ粒子とほぼ同じ粒子サイズであり、CB への加熱・担持による PtRu ナノ粒子サイズの増大は見られなかった。スパッタ金属ターゲットの Pt-Ru 面積比を変えて PtRu/CB 触媒を作製することで、PtRu ナノ粒子の Pt 含有率が 0.11~0.82 の間で制御することができた。触媒粒子の XRD パターンでは、Pt 含有率の減少とともに回折ピークが高角度側にシフトし、PtRu 合金ナノ粒子の生成が確認された。PtRu/CB のメタノール酸化反応のサイクリックボルタモグラムを測定し、Pt 重量あたりの 0.6 V vs. RHE におけるメタノール酸化電流値と PtRu 粒子組成の関係を求めた (図 1)。触媒中の Pt 含有率に対して火山型の関係が得られた。Pt 含有率が約 0.5 において最大の電極触媒活性となり、その値は純 Pt 粒子よりも約 7 倍大きなものであった。また別々に作製した Pt ナノ粒子と Ru ナノ粒子を混合して CB 上に同時担持した PtRu 粒子触媒は、同時スパッタ蒸着で作製した PtRu/CB よりも Pt 重量活性が小さくなった。このことからイオン液体への PtRu 同時スパッタによる PtRu 合金化が触媒活性の高活性化に重要であることがわかる。

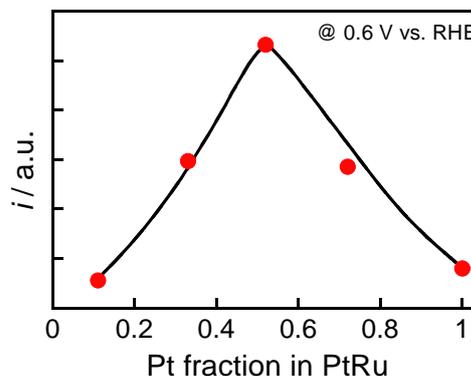


図 1 PtRu/CB 触媒における PtRu 組成と Pt 重量あたりのメタノール酸化電流値 (+0.60 V vs. RHE) との関係。

4-2. AuRh 合金ナノ粒子の作製と酸素還元反応 (ORR) に対する電極触媒活性評価

Pt ナノ粒子は、様々な反応に対して高い活性が期待されるものの、希少金属であり高価なために代替材料の探索が活発に行われている。例えば、Pt と Co, Ni などを合金あるいは複合化させたナノ粒子触媒が、燃料電池の電極触媒等への応用を目指して盛んに研究されている。本研究項目では、脱 Pt 触媒開発のために、バルク状態では合金を作らない組合せである Au と Rh を対象として、これら 2 種類の金属を同時にイオン液体 (DEME-BF₄) にスパッタ蒸着することで AuRh 合金ナノ粒子を作製した。さらにナノ粒子触媒の酸素還元反応 (ORR) に対する電極触媒活性を評価するために、CB 粉末上に加熱担持し (AuRh/CB)、0.5 M KOH 水溶液中で対流ボルタモグラム測定によって ORR に対する触媒活性を評価した。

得られる AuRh ナノ粒子組成は、Au-Rh 交互配列ターゲット中での Au 面積比を変化させることで任意に制御することができた。TEM 観察から、CB 上に球状の粒子が密に担持されている様子が確認できた。粒径は組成に依存し、AuRh ナノ粒子中での Au 含有率が増加するのに伴い、1.9 nm から 8.8 nm へと増加した。XRD 測定から、AuRh/CB の回折ピーク角度は、対応する Au 金属および Rh 金属の回折ピーク角度の中間に位置し、Rh 含有率の増加に伴って高角度側にシフトした。これらのことから、Au と Rh が非平衡な合金状態を形成していることが分かった。AuRh/CB の ORR 電極触媒活性を測定したところ、図 2 に示すように、粒子表面に存在する Au と Rh の割合に依存して火山型の挙動を示し、表面原子数の割合が Au:Rh=60:40 となる触媒粒子で活性が最大となることを見出した。

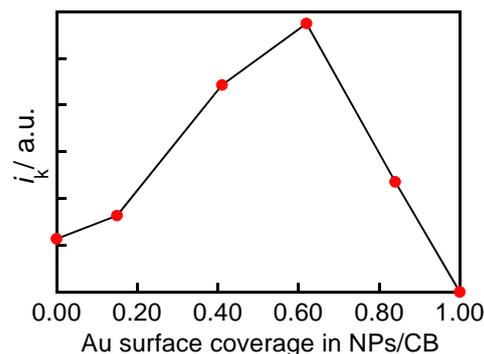


図 2 AuRh/CB 触媒における粒子組成と ECSA あたりの ORR 電流値 (+0.80 V vs. RHE) との関係。

4-3. AuNi 合金ナノ粒子の作製と尿素酸化反応 (UOR) に対する電極触媒活性評価

尿素は常温常圧で固体であり運搬が容易なうえ無毒で安定であることから、水素燃料に代わる燃料になると期待されている。これまでに Ni 金属および Ni 合金からなるナノ粒子が比較的高い尿素酸化活性を示すことが報告されているが、広範囲な合金探索は未だなされていない。そこで本研究項目では、Au と Ni の交互配列ターゲットを用い、これをイオン液体 (EMI-BF₄) に対

してスパッタ蒸着して Au-Ni 複合ナノ粒子を作製した。さらに得られた粒子を CB 粉末に担持して、AuNi 担持 CB 触媒 (AuNi/CB) を作製し、0.1 M 尿素を含む 0.1M NaOH 水溶液中でサイクリックボルタモグラムを測定した。

AuNi/CB の TEM 観察から、平均粒径 7.4 nm の球状 AuNi 複合ナノ粒子が CB 粒子表面に密に担持されていることがわかった。蛍光 X 線分析により粒子組成を分析したところ、AuNi 粒子中の Ni 含有割合は、用いる Au-Ni 交互配列ターゲット中の Ni 面積比を変化させることで、0.2~0.8 の間で制御することができた。AuNi/CB を電極上に担持して尿素酸化反応活性を評価した。0.6 V vs. Ag/AgCl における尿素酸化電流密度を電極上に担持した金属物質量で規格化したところ、AuNi/CB 中の Ni 含有量に対して火山型のプロットとなった。尿素酸化反応に対する電極触媒活性は、尿素含有率が約 0.8 の AuNi/CB 触媒で最も高くなり、その値は Ni/CB 触媒の 3 倍となった。このように、イオン液体/金属スパッタリング法を用いることでナノレベルあるいは原子レベルで Au と Ni が複合化・合金化した触媒粒子を作製することが可能となり、尿素酸化反応活性を大きく増大させることに成功した。

4-4. Ag ドープによる AuNi 合金ナノ粒子の尿素酸化反応活性の向上

前述のように、イオン液体/金属スパッタリング法を用いて作製した NiAu 複合ナノ粒子が、尿素酸化に対して Ni ナノ粒子よりも高い電極触媒活性を示すことがわかった。一方で最近、Ag ナノ粒子が尿素酸化反応に対して高い活性を示すことが報告された (Vignesh Kumar ら、J. Electrochem. Soc., 165, B3006-B3016 (2018))。本研究項目は、Ag を NiAu 複合粒子にドープすることで、液相化学合成では作製が困難な三元系金属ナノ粒子である AgAuNi 複合ナノ粒子を作製し、尿素酸化活性のより高活性化を目指した。

イオン液体 (EMI-BF₄) に対して、AgAuNi 交互配列ターゲットをスパッタリングすることで三元 AgAuNi 複合ナノ粒子を作製し、得られたナノ粒子をカーボンブラック (CB) 粉末に担持して AgAuNi ナノ粒子担持 CB 触媒 (AgAuNi/CB) を得た。この粒子の触媒活性は、0.1 M 尿素を含む 0.1 M NaOH 水溶液中で測定した。

TEM 観察から、CB 粒子表面には粒径 5.5 nm の球状 AgAuNi 複合ナノ粒子が密に担持されていることがわかった。交互配列ターゲット中の各金属面積比を変化させることで、三元ナノ粒子の組成を自在に変調できることがわかった。

AgAuNi/CB 触媒を担持した電極を用いて、尿素酸化活性を測定したところ、図 3 に示す組成依存性が得られた。ここでは Au/Ag 比を約 4~5 に固定した NiAuAg/CB 触媒を用いている。尿素酸化電流密度 (Ni 担持量で規格化) は、Au/Ag 比がほぼ一定であるにもかかわらず NiAuAg ナノ粒子の組成によって大きく変化した。電極触媒活性は、Ni 含有量が 0.8 と比較的多い NiAuAg 粒子において純 Ni 粒子よりも約 1.5 倍高い活性を示した。しかしながら、項目 4-3 での AuNi/CB 触媒の最高活性の約 1/2 となり、Ag ドープを行ってもあまり尿素酸化活性が向上しなかった。このことは、三元 AgAuNi ナノ粒子触媒をより高活性化するためには、Ni 含有率だけではなく各金属の組成比 (Ag: Au: Ni) の精密制御が必要であることを示唆する。

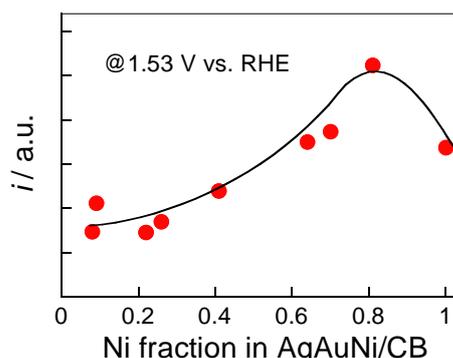


図 3 AgAuNi/CB 触媒における粒子組成と Ni 重量あたりの尿素酸化電流値 (+1.53 V vs. RHE) との関係。

4-5. 結論

本研究では、イオン液体/金属スパッタリング法を用いることによって、これまでの液相化学合成法では作製が困難な非平衡な合金からなるナノ粒子の合成が可能であることを明らかにした。得られた合金ナノ粒子の電極触媒活性を測定したところ、メタノール酸化反応、酸素還元反応、尿素酸化反応のいずれにおいても火山型の依存性を示し、組成の精密最適化によって触媒活性が高活性化できることを見出した。さらに、イオン液体/金属スパッタリング法を用いて三元 AgAuNi ナノ粒子の合成にも成功した。AgAuNi ナノ粒子の尿素酸化活性も、粒子組成に大きく依存して変化した。より高活性化には三元元素の組成比 (Ag: Au: Ni 比) の精密制御が必要であることがわかった。今後は、イオン液体/金属スパッタリング法により得た多元合金ナノ粒子のサイズが非常に小さいことを利用し、半導体光触媒あるいは量子ドット光触媒に助触媒として担持し、水の完全光分解やバイオマスからのエネルギー回収など、光-化学エネルギー変換システムの高効率化に役立てていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kameyama Tatsuya, Sugiura Kouta, Kuwabata Susumu, Okuhata Tomoki, Tamai Naoto, Torimoto Tsukasa	4. 巻 10
2. 論文標題 Hot electron transfer in Zn-Ag-In-Te nanocrystal?methyl viologen complexes enhanced with higher-energy photon excitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 16361 ~ 16365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra02842h	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 Minowa Yosuke, Kuramoto Shohei, Kameyama Tatsuya, Torimoto Tsukasa, Ashida Masaaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Synthesis of submicron-sized CdS particles using reverse micelles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JNP.14.026013	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 Hsieh Ping-Yen, Kameyama Tatsuya, Takiyama Takayuki, Masuoka Ko, Yamamoto Takahisa, Hsu Yung-Jung, Torimoto Tsukasa	4. 巻 8
2. 論文標題 Controlling the visible-light driven photocatalytic activity of alloyed ZnSe-AgInSe2 quantum dots for hydrogen production	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 13142 ~ 13149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ta04127k	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 Yoda Masaomi, Takashima Toshihiro, Akiyoshi Kazutaka, Torimoto Tsukasa, Irie Hiroshi	4. 巻 153
2. 論文標題 Red light-inducible overall water-splitting photocatalyst, gold-inserted zinc rhodium oxide and bismuth vanadium oxide heterojunction, connected using gold prepared by sputtering in ionic liquid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 014701 ~ 014701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010100	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 Akiyoshi Kazutaka, Kameyama Tatsuya, Yamamoto Takahisa, Kuwabata Susumu, Tatsuma Tetsu, Torimoto Tsukasa	4. 巻 10
2. 論文標題 Controlling the oxidation state of molybdenum oxide nanoparticles prepared by ionic liquid/metal sputtering to enhance plasmon-induced charge separation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 28516 ~ 28522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra05165a	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 Suzuki Shushi, Morimoto Atsumi, Kuwabata Susumu, Torimoto Tsukasa	4. 巻 60
2. 論文標題 Shape-controlled synthesis of Cu ₂ O nanoparticles with single-digit nanoscale void space via ionic liquid/metal sputtering and their photoelectrochemical properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SAAC01 ~ SAAC01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb75a	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 Motomura Genichi, Ogura Kei, Iwasaki Yukiko, Uematsu Taro, Kuwabata Susumu, Kameyama Tatsuya, Torimoto Tsukasa, Tsuzuki Toshimitsu	4. 巻 117
2. 論文標題 Electroluminescence from band-edge-emitting AgInS ₂ /GaSx core/shell quantum dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 091101 ~ 091101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0018132	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 Tatsuya Kameyama, Hiroki Yamauchi, Takahisa Yamamoto, Toshiki Mizumaki, Hiroshi Yukawa, Masahiro Yamamoto, Shigeru Ikeda, Taro Uematsu, Yoshinobu Baba, Susumu Kuwabata, and Tsukasa Torimoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Tailored Photoluminescence Properties of Ag(In,Ga)Se ₂ Quantum Dots for Near-Infrared In Vivo Imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Nano Mater.	6. 最初と最後の頁 3275-3287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.9b02608	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 Tatsuya Kameyama, Kouta Sugiura, Susumu Kuwabata, Tomoki Okuhata, Naoto Tamai, and Tsukasa Torimoto	4. 巻 5
2. 論文標題 Enhanced Photoelectrochemical Properties of Zn-Ag-In-Te Nanocrystals with High Energy Photon Excitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemNanoMat	6. 最初と最後の頁 1028-1035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cnma.201900241	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 Reiko Izumi, Yu Yao, Tetsuya Tsuda, Tsukasa Torimoto and Susumu Kuwabata	4. 巻 6
2. 論文標題 Oxygen Reduction Electrocatalysts Sophisticated by Using Pt Nanoparticle-dispersed Ionic Liquids with Electropolymerizable Additives	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A.	6. 最初と最後の頁 11853-11862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8ta03465f	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 Wataru Minoshima, Ryuya Ito, Takayuki Takiyama, Tatsuya Kameyama, Tsukasa Torimoto, and Keiko Tawa	4. 巻 367
2. 論文標題 Photoluminescence Characterization of ZnS-AgInS ₂ (ZAIS) Nanoparticles Adsorbed on Plasmonic Chip Studied with Fluorescence Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Photochem. Photobiol. A: Chem.	6. 最初と最後の頁 347-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochem.2018.08.032	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 Taro Uematsu, Kazutaka Wajima, Dharmendar Kumar Sharma, Shuzo Hirata, Takahisa Yamamoto, Tatsuya Kameyama, Martin Vacha, Tsukasa Torimoto, and Susumu Kuwabata	4. 巻 10
2. 論文標題 Narrow Band-edge Photoluminescence from AgInS ₂ Semiconductor Nanoparticles by the Formation of Amorphous III-VI Semiconductoer Shells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NPG Asia Mater.	6. 最初と最後の頁 713-726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41427-018-0067-9	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 Yasutaka Suzuki, Shozo Onishi, Kazuya Matsumoto, Takayuki Takiyama, Tatsuya Kameyama, Tsukasa Torimoto, and Jun Kawamata	4. 巻 47
2. 論文標題 Two-photon Absorption Spectrum of Solid Solution Nanocrystals of ZnS-AgInS2	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 1475-1477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.180718	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 Tatsuya Kameyama, Marino Kishi, Chie Miyamae, Dharmendar Kumar Sharma, Shuzo Hirata, Takahisa Yamamoto, Taro Uematsu, Martin Vach, Susumu Kuwabata, and Tsukasa Torimoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Wavelength-Tunable Band-Edge Photoluminescence of Nonstoichiometric Ag-In-S Nanoparticles via Ga ³⁺ Doping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 42844-42855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.8b15222	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 本村玄一, 都築俊満, 亀山達矢, 鳥本 司, 上松太郎, 桑畑 進	4. 巻 53
2. 論文標題 ZnS-AgInS2 固溶体 (ZAIS) を用いた低毒性量子ドットEL 素子の作製	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 497-499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 亀山達矢, 桑畑 進, 鳥本 司	4. 巻 54
2. 論文標題 多元金属カルコゲニド量子ドットの液相合成と光触媒活性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 31-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Nurmanita Rismaningsih, Hiroki Yamauchi, Tatsuya Kameyama, Takahisa Yamamoto, Saho Morita, Hiroshi Yukawa, Taro Uematsu, Yoshinobu Baba, Susumu Kuwabata and Tsukasa Torimoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Photoluminescence Properties of Quinary Ag-(In,Ga)-(S,Se) Quantum Dots with a Gradient Alloy Structure for in vivo Bioimaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. C	6. 最初と最後の頁 12791-12801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TC02746H	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 Yasuyuki Tsuboi, Shota Naka, Daiki Yamanishi, Tatsuya Nagai, Ken-ichi Yuyama, Tatsuya Shoji, Bunsho Ohtani, Mamoru Tamura, Takuya Iida, Tatsuya Kameyama, and Tsukasa Torimoto	4. 巻 4
2. 論文標題 Optical Trapping of Nanocrystals at Oil/Water Interfaces: Implications for Photocatalysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Appl. Nano Mater.	6. 最初と最後の頁 11743-11752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c02335	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 Junsuke Yamanishi, Hidemasa Yamane, Yoshitaka Naitoh, Yan Jun Li, Nobuhiko Yokoshi, Tatsuya Kameyama, Seiya Koyama, Tsukasa Torimoto, Hajime Ishihara, and Yasuhiro Sugawara	4. 巻 12
2. 論文標題 Optical Force Mapping at the Single-Nanometre Scale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 3865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24136-2	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 -

〔学会発表〕 計13件(うち招待講演 11件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 T. Torimoto, K. Masuoka, T. Kameyama, and S. Kuwabata
2. 発表標題 Photocatalytic H ₂ Evolution with Anisotropic-Shaped ZnSe-AgInSe ₂ Solid Solution Nanorods
3. 学会等名 Pacific RIM Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRIME2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsukasa Torimoto, Tatsuya Kameyama, Susumu Kuwabata
2. 発表標題 Ionic Liquid/Metal Sputtering Technique for Preparation of Metal and Alloy Nanoparticles
3. 学会等名 ISPlasma2020 / IC-PLANTS2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsukasa Torimoto, Kosuke Sasamoto, Tatsuya Kameyama
2. 発表標題 Size- and composition-dependent localized surface plasmon resonance of colloidal Au-Ag nanorings
3. 学会等名 The International Symposium Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsukasa Torimoto, Tatsuya Kameyama, Susumu Kuwabata
2. 発表標題 Solution-phase Syntheses of Multinary Semiconductor Nanocrystals Composed of Less-toxic Elements and Their Photochemical Properties
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Torimoto, S. Koyama, T. Kameyama
2. 発表標題 Preparation of Dumbbell-Shaped Nanocrystals Composed of ZnS-AgInS ₂ Solid Solution and Their Photocatalytic H ₂ Evolution Activity
3. 学会等名 233rd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kaneyama, K. Sato, and T. Torimoto
2. 発表標題 Acceleration of Electrocatalytic Reaction By Photoexciting Localized Surface Plasmon of Octahedral Au@Pt Core-Shell Nanoparticles
3. 学会等名 233rd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kaneyama, S. Koyama, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Torimoto
2. 発表標題 Photocatalytic H ₂ Evolution Activity of Dumbbell-shaped Nanocrystals Composed of ZnS-AgInS ₂ Solid Solution
3. 学会等名 Materials Challenges in Alternative and Renewable Energy (MCARE 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥本 司
2. 発表標題 低毒性多元量子ドットの液相化学合成と光機能材料への応用
3. 学会等名 電気化学会関東支部第54回学際領域セミナー～光電気化学的応用のためのナノ材料設計～ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥本 司
2. 発表標題 多元化合物半導体量子ドットの合成と発光材料への応用
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsukasa Torimoto, Naoko Yamaguchi, Yui Maeda, Kazutaka Akiyoshi, Tatsuya Kameyama, Tatsuya Shoji, Yasuyuki Tsuboi, Hajime Ishihara
2. 発表標題 Development of Plasmonic Thin Layer Chromatography for Size Separation of Quantum Dots
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsukasa Torimoto, Tatsuya Kameyama
2. 発表標題 Solution-Phase Preparation of AgInS ₂ -Based Semiconductor Nanocrystals and Their Tunable Photoluminescence Properties
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazutaka Akiyoshi, Tatsuya Kameyama, Susumu Kuwabata, Tsukasa Torimoto
2. 発表標題 Photoelectrochemical Properties of Plasmonic Molybdenum Oxide Nanoparticles Prepared by an Ionic Liquid/Metal Sputtering Technique
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 由実, 秋吉 一孝, 亀山 達矢, 桑畑 進, 鳥本 司
2. 発表標題 金属スパッタ蒸着によるコアシェル構造Au@Niナノ粒子膜の作製と尿素酸化電極触媒活性の向上
3. 学会等名 2022年電気化学会第89回大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 鳥本 司, 亀山達矢, 津田哲哉, 桑畑 進	4. 発行年 2020年
2. 出版社 R & D支援センター	5. 総ページ数 354
3. 書名 金属ナノ粒子の合成 / 構造制御とペースト化および最新応用展開	

1. 著者名 Tsukasa Torimoto, Tatsuya Kameyama	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 593
3. 書名 Photosynthetic Responses in Molecules and Molecular Aggregates	

1. 著者名 亀山達矢, 鳥本 司	4. 発行年 2019年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 196
3. 書名 プラズモンと光圧が導くナノ物質科学 (CSJ: 32)	

〔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
研究 分 担 者	亀山 達矢 (Kameyama Tatsuya) (40646759)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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