

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02814

研究課題名(和文) イオン液体を反応媒体にしたワンポットプロセスによる酸素還元電極触媒作製

研究課題名(英文) Fabrication of Oxygen Reduction Electrocatalysts by One-Pot Process Using Ionic Liquids as Reaction Media

研究代表者

津田 哲哉 (Tsuda, Tetsuya)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90527235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：イオンのみから構成される液体であるイオン液体に金属ナノ粒子前駆体と炭素担体を添加し、加熱攪拌するだけで金属ナノ粒子担持炭素材料が得られるイオン液体-熱分解法(イオン液体-熱還元法)によって、工学的価値の高い酸素還元電極触媒合成法を確立した。白金(Pt)前駆体とニッケル(Ni)前駆体、多層カーボンナノチューブ(MWCNT)が共存する条件では、PtNi合金ナノ粒子担持MWCNTが得られ、酸素還元電極触媒として魅力的な材料を合成することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン液体-熱分解法は1つの容器の中で金属ナノ粒子担持炭素材料の合成が完了するワンポットプロセスであるが、その合成メカニズムについては明らかとなっていなかった。本研究によって、金属ナノ粒子の担持は炭素担体上に核が形成され、そこを起点として核成長することで進行するなどの学術的に重要な知見が得られた。本手法はスケールアップが容易であるため、その知見を利用することで社会実装を見据えた酸素還元電極触媒の設計が可能となった。

研究成果の概要(英文)：A novel simple one-pot process for preparing the metal nanoparticle-supported carbon materials, i.e., oxygen reduction electrocatalysts with high engineering value, which consists of heating and stirring of the ionic liquid (IL) with metal nanoparticle precursors and carbon supports, was established in this research. This process was named one-pot IL-pyrolysis method. Under the conditions where platinum (Pt) precursors, nickel (Ni) precursors, and multi-walled carbon nanotube (MWCNT) coexist, PtNi alloy nanoparticle-supported MWCNT was successfully obtained, making it possible to synthesize materials that are attractive as oxygen reduction electrocatalysts.

研究分野：電気化学

キーワード：電極触媒 酸素還元 燃料電池 イオン液体 ワンポット

1. 研究開始当初の背景

電子顕微鏡を始めとする様々な分析技術の著しい発展やナノ材料合成法の確立によって、ナノ材料に対する注目度は高まっている。なかでも、ナノ粒子は比表面積が大きく、量子サイズ効果や表面プラズモン共鳴など、バルク構造では期待できない特異な挙動を示すため、光学材料、電極触媒などへの展開が期待されている。しかし、従来の合成法で得られるナノ粒子は凝集を防ぐため、表面は安定化剤で覆われていることが一般的であり、期待した物性が発現しないことも少なくない。

カチオンとアニオンのみから構成される室温で液体の塩であるイオン液体は、水溶液と同様に取り扱うことが可能であるにもかかわらず、多くの特異な物理化学的性質(難燃性、不揮発性、広い液相温度範囲、高い電気化学安定性、高いイオン伝導率など)を併せ持つ。その物性はイオン種の組み合わせによって、デザイン可能であることから、イオン液体は機能性溶媒・液体材料として、様々な分野への応用が検討されている。例えば、イオン液体を溶媒に用いてナノ粒子を調製すると、イオン液体特有の局所液体構造やナノ粒子-イオン液体間の相互作用のために安定化剤を添加することなく、ナノ粒子の単分散状態を維持することができる。そのため、最近ではナノ粒子調製用の反応媒体として、イオン液体を用いることが増えている。研究代表者はイオン液体中に存在する金属前駆体の熱分解によるナノ粒子調製(イオン液体-熱分解法(イオン液体-熱還元法と同義語))を着想し、イオン液体に金属前駆体とカーボンブラック、グラフェン、カーボンナノチューブなどの炭素担体を加えて 573 K で加熱攪拌することで、金属ナノ粒子担持炭素材料のワンポット合成に成功した。しかしながら、この方法によって金属ナノ粒子担持炭素材料が形成されるメカニズム、イオン液体や金属錯体の種類が電極触媒性能に与える影響など、多くの学術的研究課題は未解明なままであった。

2. 研究の目的

イオン液体-熱分解法は極めて簡便なプロセスであることから、スケールアップが容易という大きな長所があるが、本手法には幾つもの学術的研究課題が未解明なまま残されており、その研究課題に取り組むことによって、多くの学術的に有用な情報が得られる。この一方で、そこで得られた情報を利用した工学的展開も十分に期待でき、本手法の長所を考慮すると、その波及効果は大きなものになる可能性が高い。本手法によって、酸素還元電極触媒として利用可能な試料を合成する際、担持される金属ナノ粒子の低白金(Pt)化と触媒性能の向上を同時に満たすことが望ましい。それを可能とするには、次の2つの学術的研究課題、(i) 担体上に存在するPtナノ粒子の単位面積当たりの数が触媒能に与える影響の究明、(ii) Ptナノ粒子の遷移金属との合金化やコアシェル化(コア: 遷移金属; シェル: 白金)などの電極触媒作製時における材料形成メカニズムの解明とその電極触媒反応との相関性に関する調査が必要不可欠である。本研究では、これらの学術的研究課題に取り組むだけでなく、得られた知見を積極的に利用することで、イオン液体-熱分解法による金属ナノ粒子担持炭素材料作製法の工学的長所を活かした、高機能な酸素還元電極触媒の作製も試みた。

3. 研究の方法

本研究で用いた材料合成プロセス(イオン液体-熱分解法)の概略を図1に示した。イオン液体(トリメチルプロピルアンモニウムビス(トリフルオロメチルスルホン)アミド([N_{1,1,1,3}][Tf₂N])および1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムビス(トリフルオロメチルスルホン)アミド([C₄mim][Tf₂N]))

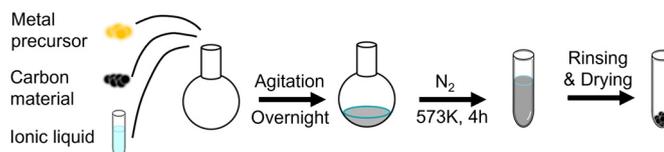


図1 本研究で用いた材料合成プロセス(イオン液体-熱分解法)の概略。

は、所定の方法によって精製したのち使用した¹⁾。金属前駆体には、platinum(II) acetylacetonate (Pt(acac)₂)、nickel(II) bis(trifluoromethanesulfonyl)amide (Ni[Tf₂N]₂)、nickel(II) acetylacetonate (Ni(acac)₂)などを利用した。炭素担体として、グラフェンがおよそ20層重なったGNP-20と3層のGNP-3、多層カーボンナノチューブ(MWCNT)などを用いた。イオン液体に所定量の金属前駆体(5 mmol L⁻¹など)と炭素担体(1.25 g L⁻¹)を添加して十分に攪拌・脱気したのち、窒素雰囲気下、573 Kで4時間攪拌することで、金属ナノ粒子担持炭素材料を作製した。得られた試料はアセトニトリルと超純水によって洗浄したのち、透過型電子顕微鏡(TEM)観察(電子線回折、エネルギー分散型X線分光法(EDX)、高角度散乱暗視野走査透過電子顕微鏡(HAADF-STEM)観察を含む)、X線回折法(XRD)、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP-AES)などによるキャラクタリゼーションを行った。

合成した金属ナノ粒子担持炭素材料の酸素還元電極触媒能の評価は3極式セルを用いた電気化学測定により行った。合成した炭素材料を0.147 g_{Pt} L⁻¹となるように溶媒(H₂O:2-プロパノール

ル=1:3)に加えたものを触媒インクとした。これを回転円板電極用のグラッシカーボンに 10 μL 塗布し、約 1 時間かけて乾燥させた。触媒層を固定させるため、0.10 wt%に調整した Nafion[®] 溶液をその上に 10 μL 塗布して、約 1 時間かけて乾燥させた。これを作用極とし、対極には Pt メッシュ、参照極には可逆水素電極、電解液には 0.1 M HClO₄ 水溶液を用いた。電解液は使用前に、酸素 (99.999%)、窒素 (99.9999%) で 30 分以上バブリングした。比較のため、市販の燃料電池触媒についても同様の評価を行った。触媒の耐久性評価は、燃料電池実用化推進協議会で推奨されている起動停止試験前後の電気化学的有効比表面積 (ECSA) や酸素還元反応に対する質量活性の変化から見積もった。

4. 研究成果

(1) イオン液体や炭素担体の種類が Pt ナノ粒子担持炭素材料に与える影響²

イオン液体や炭素担体の種類がイオン液体-熱分解法に及ぼす影響を明らかとするため、種々の条件で Pt ナノ粒子担持炭素材料を調製し、得られた試料を酸素還元電極触媒として使用したときの ECSA、質量活性、耐久性について評価した。炭素材料には、GNP-3、GNP-20、MWCNT を用い、Pt 前駆体およびイオン液体は、それぞれ Pt(acac)₂、[Ni_{1,1,1,3}][Tf₂N] または [C₄mim][Tf₂N] とした。得られた試料は、イオン液体や炭素担体の種類に依存することなく、Pt ナノ粒子が炭素担体に単分散状態で担持されていた。その例として、イオン液体に [C₄mim][Tf₂N] を用いて作製した試料 (Pt/GNP-3、Pt/GNP-20、Pt/MWCNT) の TEM 像

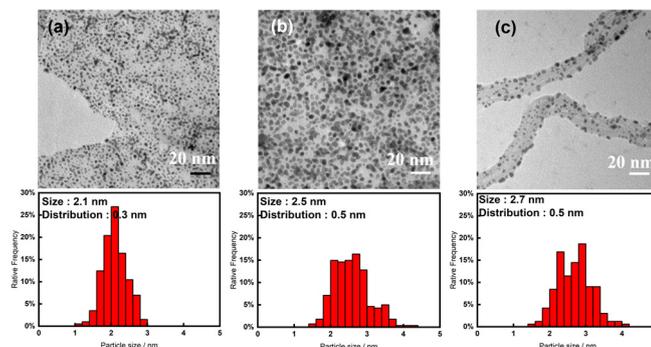


図2 種々の炭素担体を用いて作製した Pt ナノ粒子担持炭素材料 (Pt/GNP-3, Pt/GNP-20, Pt/MWCNT) の TEM 像とそれぞれの試料における Pt ナノ粒子の粒径分布. 炭素担体: (a) GNP-3; (b) GNP-20; (c) MWCNT. イオン液体の種類は [C₄mim][Tf₂N] であった.

と担持された Pt ナノ粒子の粒径分布を図 2 に示している。炭素担体の種類が異なる以外、全て同じ条件で試料の調製を行ったにもかかわらず、GNP-3、GNP-20、MWCNT に担持された Pt ナノ粒子の平均粒径は、それぞれ、2.1 nm、2.5 nm、2.7 nm であった。炭素担体の比表面積を測定したところ、その粒径は比表面積の増大に伴い、減少する傾向にあることが分かった。また、Pt 担持量は炭素担体の種類に依存せず、 $25.5 \pm 1 \text{ wt}\%$ であった。つまり、比表面積の増大は核形成点の増加をもたらす一方、核形成点 1 つあたりの核成長 (粒子成長) に利用できる Pt 量は減少してしまうため、比表面積と粒径の間に相関性が生じたと考えられる。つまり、Pt ナノ粒子の炭素担体への担持は、イオン液体を反応媒体にして調製した Pt ナノ粒子を炭素担体に担持する際に用いられる 2 ステッププロセスのように³、イオン液体中で成長した Pt ナノ粒子が加熱プロセスで炭素担体に担持される訳ではないことを示唆している。本手法によって担持された Pt ナノ粒子の粒径は、イオン液体の種類によっても変化し、[C₄mim][Tf₂N] を用いると、より小さな Pt ナノ粒子が得られた。これは五員環を有する [C₄mim] カチオンの方が [Ni_{1,1,1,3}] カチオンよりも、Pt ナノ粒子表面への吸着面積が大きく、粒子の成長を阻害する効果がより大きいためと考えられる。さらに、炭素担体に窒素ドーピンググラフェンを用いた場合でも、Pt ナノ粒子は窒素ドーピンググラフェン上に凝集することなく担持されることが分かった (平均粒径: 3.3 nm)。これは上述した窒素非ドーピングの炭素材料を使用した場合の結果と酷似しており、ドーピングされた窒素が Pt ナノ粒子の生成プロセスやその担持過程に及ぼす影響はないと判断した。

本研究で得られた知見を利用すると、Pt ナノ粒子の粒径を維持したまま、炭素担体に担持する Pt ナノ粒子の数密度を容易に制御できるため、平面性の高い Pt/GNP-20 を用いて数密度と酸素還元反応に対する質量活性との相関性について検討した。酸素還元電極触媒能は、炭素担体表面に存在する Pt ナノ粒子の数密度に大きく左右され、数密度が大きくなると酸素還元に必要な物質輸送が不十分な Pt ナノ粒子が現れることを示唆する結果が得られた。Pt ナノ粒子の粒径が酸素還元触媒能に与える影響については広く知られているが、数密度も重要な要素であることを実験的に証明できた。

(2) PtNi ナノ粒子担持 MWCNT (PtNi/MWCNT) の合成^{4,5}

Pt 前駆体 (Pt(acac)₂)、Ni 前駆体 (Ni[Tf₂N]₂ または Ni(acac)₂)、MWCNT をイオン液体 ([Ni_{1,1,1,3}][Tf₂N]) に添加し、イオン液体-熱分解法による PtNi ナノ粒子担持 MWCNT (PtNi/MWCNT) の合成を試みたところ、どちらの Ni 前駆体を用いても PtNi/MWCNT は得られた。しかし、熱安定性の高い Ni[Tf₂N]₂ を用いた場合には、Pt ナノ粒子の平均粒径は小さく (1.6 nm)、Pt ナノ粒子に含まれる Ni 含有量 (33.6 at%) が 10 at% 程度低くなった。なお、Ni(acac)₂ を用いたときには、担持される Pt ナノ粒子の平均粒径が 3.3 nm、Ni 含有量は 42.7 at% であった。Pt と Ni がどのような状態で Pt ナノ粒子の中に存在しているのかを明らかとするため、HAADF-STEM 像や EDX マッピングにより得られた試料を調査した。Pt ナノ粒子内での Pt および Ni の元素分布は均

一であったことから、得られた粒子は Ni コア-Pt シェルのナノ粒子ではなく、Pt と Ni が合金化したナノ粒子 (PtNi 合金ナノ粒子) であることが示唆された (図 3)。同様の結果が XRD 測定でも得られたことから、本合成条件では PtNi 合金ナノ粒子が担持された MWCNT (PtNi 合金/MWCNT) が得られると判断した。ここでの合成では、Ni(acac)₂ の [Ni_{1.1,1.3}][Tf₂N] への溶解度が Ni[Tf₂N]₂ よりも低く、溶け残った Ni(acac)₂ を分散させた状態で材料合成を行ったが、問題無く PtNi 合金/MWCNT を得ることができた。[Ni_{1.1,1.3}][Tf₂N] に不溶であるシュウ酸ニッケル(II) 二水和物 (NiC₂O₄·2H₂O) を用いても、同様の結果が得られたことから、金属前駆体のイオン液体への溶解度は前駆体を選択する際の条件として考慮する必要はないことが明らかとなった。つまり、イオン液体-熱分解法はイオン液体の熱分解温度よりも低い温度で前駆体が熱還元されるのであれば、前駆体の溶存状態に依存することなく、ナノ粒子が得られるといった重要な知見を見出すことができた。

本研究で作製した PtNi 合金/MWCNT は固体高分子形燃料電池用の酸素還元電極触媒としての利用が期待されるため、その電極触媒能を電気化学的手法によって調査したところ、ECSA や酸素還元反応の質量活性は市販触媒を超える耐久性を示した (図 4)。その傾向は Ni(acac)₂ を用いた際により顕著となったが、PtNi ナノ粒子に含まれる Ni 含有量の差異がその一因となっている可能性が高い。また、耐久性試験の実施によって、PtNi 合金/MWCNT から Ni が溶出し、同じ試料であっても質量活性は耐久性試験前後で大きく変化した。PtNi 合金中の Ni 含有量と質量活性の関係を Ni 含有量に対してプロットすると、質量活性は Ni 含有量が 25 at% 付近で最大となるガウス分布に従う傾向にあることが分かった。

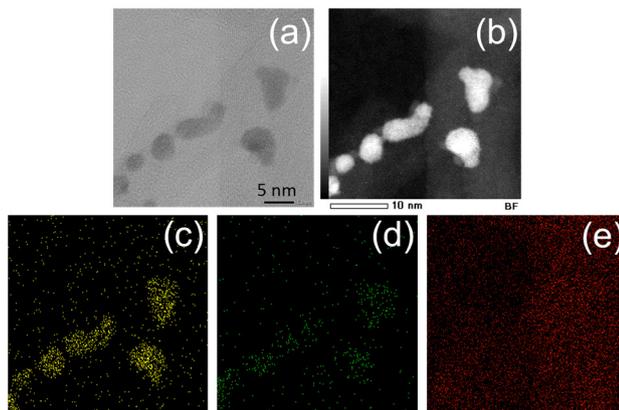


図 3 本研究で得られた PtNi 合金/MWCNT の (a) 高分解能 TEM 像, (b) HAADF-STEM 像, EDX マッピングの例: (c) Pt, (d) Ni, (e) C. 合成に用いた金属前駆体は Pt(acac)₂ と Ni(acac)₂. イオン液体の種類は [Ni_{1.1,1.3}][Tf₂N] であった。

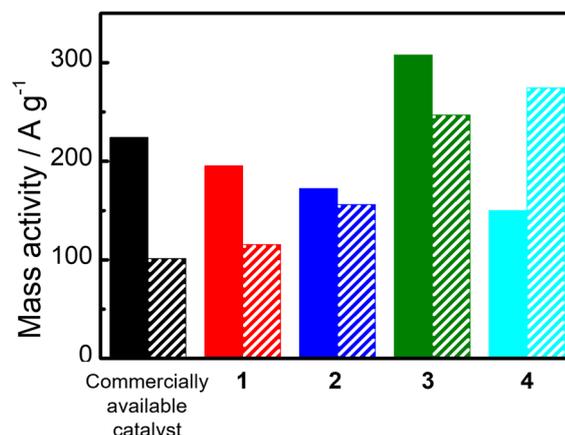


図 4 種々の条件で得られた PtNi 合金/MWCNT の耐久性試験前後における質量活性. 試料 1-4 の詳細な情報については引用文献 4 を参照のこと。

(3) PtNi 合金ナノ粒子の形成メカニズム⁶

イオン液体-熱分解法によって、固体高分子形燃料電池の酸素還元電極触媒として有望である PtNi 合金/MWCNT が合成できることを見出したが、Ni 塩の種類が PtNi 合金ナノ粒子の形成メカニズムに与える影響については、ナノ粒子の設計指針に関する重要な知見をもたらす可能性が高いにも関わらず、全く調査が進んでいなかった。そのような背景から、加熱プロセスの温度と時間を多段階で制御しながら、2つの異なる Ni 前駆体 (Ni[Tf₂N]₂, Ni(acac)₂) を用いてイオン液体-熱分解法による PtNi 合金/MWCNT の合成を行い、その結果の差異から PtNi 合金ナノ粒子の形成メカニズムを解明することに取り組んだ。金属前駆体の熱安定性が Pt 前駆体 (Pt(acac)₂) よりも高い Ni[Tf₂N]₂ を用いた場合には、Pt ナノ粒子が優先的に生成した。一方、熱安定性が Pt(acac)₂ より劣る Ni(acac)₂ を使用すると、Ni ナノ粒子ではなく、Ni リッチな PtNi 合金ナノ粒子が生成したことから、電気化学的に活性な Ni ナノ粒子が Pt 前駆体を還元し、Ni 表面への Pt の析出が促されたことによって合金化

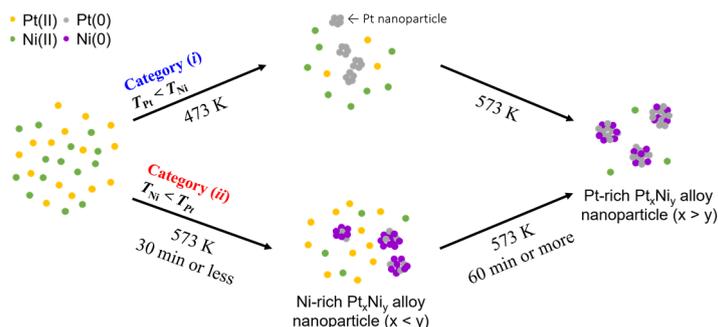


図 5 本研究の結果から推察される PtNi 合金/MWCNT 合成時における PtNi 合金形成メカニズム。

が進行したと結論づけた。しかし、573 K にまで温度を上げて、加熱時間を長くすると、どちらの Ni 前駆体を用いても、最終的には類似の組成かつ粒径の PtNi ナノ粒子が得られ、MWCNT 上への担持量もほとんど同じになることが分かった。これらの結果から、イオン液体-熱分解法によって得られる PtNi 合金ナノ粒子の形成メカニズムは図 5 のように Ni 前駆体の熱安定性によって、2 つの経路 (Ni 前駆体の熱分解温度の方が Pt 前駆体よりも高い場合 (Category (i))、Pt 前駆体の方が Ni 前駆体よりも高い場合 (Category (ii))) に分類できるが、Category (i) の場合であっても、上述したように加熱温度を 573 K まで上げると Category (ii) で得られる試料と同じような粒径・組成の PtNi 合金ナノ粒子となる。そのため、573 K の加熱で得られる PtNi 合金/MWCNT の酸素還元反応に対する電極触媒能は、前駆体の種類に依存することなく、似たような値を示すと予想したが、反応の経路によって明らかな触媒能の違いがあった。ナノ粒子の表面状態や Pt の結合エネルギーが異なると考えられ、更なる分析が必要である。また、イオン液体-熱分解法によるワンポット合成プロセスのオペランド TEM 観察についても検討したが、本研究期間内に観察条件を最適化するには至らなかった。

(4) 多元系 Pt 合金ナノ粒子担持材料の合成

イオン液体-熱分解法を用いて 3 種類以上の元素を組み合わせた多元系 Pt 合金ナノ粒子担持 MWCNT のワンポット調製を行うために必要な基礎的知見を収集した。ここで対象とする金属種は結晶構造が同じ面心立方格子である 5 つの金属とし、それらを組み合わせた多元系 Pt 合金ナノ粒子担持 MWCNT (多元系 Pt 合金/MWCNT) の合成を検討した。その結果、MWCNT 上には、多くのナノ粒子が凝集することなく担持されることが分かった。添加した金属前駆体の総モル数は同じであったにもかかわらず、上述の Pt/MWCNT や PtNi 合金/MWCNT と比較して、担持された粒子の粒径は 1.5~2.0 nm 程度小さかった。この一方で、僅かではあるが、粒径が 10 nm 程度の粒子も確認できた。得られた試料の元素分析を EDX 測定により行ったところ、5 つの金属種の存在を確認することができた。興味深いことに、粒径が大きな粒子の付近では、特定の元素の存在比が高まる傾向にあり、その形成に大きな影響を与えていることが示唆された。さらに、XRD 測定によって、MWCNT 上に担持されたナノ粒子の結晶構造を調査すると、想定される金属種の回折像をただ単に重ね合わせたような回折像にはならなかった。これは多元系 Pt 合金ナノ粒子の形成を示唆する結果であり、得られたナノ粒子はハイエントロピー合金である可能性がある。しかし、その同定には HAADF-STEM 観察、X 線光電子分光法 (XPS) などによる更なる試料の分析が必要不可欠である。

<引用文献>

1. Modern Aspects of Electrochemistry Vol. 45, Electrochemistry of Room-Temperature Ionic Liquids and Melts: Tsuda, Tetsuya; Hussey, Charles L. White, Ralph E., ed., Springer (New York, USA), Chapter 2, pp. 63-174, 2009.
2. Yao, Yu; Xiao, Qingning, Kawaguchi, Masafumi; Tsuda, Tetsuya; Yamada, Hirohisa; Kuwabata, Susumu. RSC Advances, 12, 14268-14277, 2022.
3. 津田哲哉, 熔融塩および高温化学, 66(1), 3-11, 2023.
4. Yao, Yu; Izumi, Reiko; Oshima, Yoshifumi; Tsuda, Tetsuya; Kuwabata, Susumu. ACS Appl. Energy Materials, 2, 4865-4872, 2019.
5. Yao, Yu; Xiao, Qingning; Tsuda, Tetsuya; Kuwabata, Susumu. Electrochemistry, 88, 353-355, 2020.
6. Yao, Yu; Izumi, Reiko; Tsuda, Tetsuya; Aso, Kohei; Oshima, Yoshifumi; Kuwabata, Susumu. ACS Omega, 5, 25687-25694, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 津田哲哉	4. 巻 66(1)
2. 論文標題 有機イオン液体中での金属ナノ粒子の調製とその電極触媒への応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 溶融塩および高温化学	6. 最初と最後の頁 3-11
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 Yao Yu, Tsuda Tetsuya, Torimoto Tsukasa, Kuwabata Susumu	4. 巻 -
2. 論文標題 Electrocatalyst Fabrication Using Metal Nanoparticles Prepared in Ionic Liquids	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Chemical Record	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tcr.202200274	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 Yao Yu, Xiao Qingning, Tsuda Tetsuya, Kuwabata Susumu	4. 巻 88
2. 論文標題 PtNi Alloy Nanoparticle-Supported MWCNTs Produced in a Nickel(II) Oxalate Dihydrate Dispersed Ionic Liquid with Pt(acac) ₂ by One-Pot Pyrolysis Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 353 ~ 355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5796/electrochemistry.20-64065	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 Yao Yu, Izumi Reiko, Tsuda Tetsuya, Aso Kohei, Oshima Yoshifumi, Kuwabata Susumu	4. 巻 5
2. 論文標題 One-Pot Synthesis of PtNi Alloy Nanoparticle-Supported Multiwalled Carbon Nanotubes in an Ionic Liquid Using a Staircase Heating Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 25687 ~ 25694
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsomega.0c02951	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 Yao Yu, Izumi Reiko, Tsuda Tetsuya, Oshima Yoshifumi, Imanishi Akihito, Oda Naoko, Kuwabata Susumu	4. 巻 2
2. 論文標題 Platinum and PtNi Nanoparticle-Supported Multiwalled Carbon Nanotube Electrocatalysts Prepared by One-Pot Pyrolytic Synthesis with an Ionic Liquid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 4865 ~ 4872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.9b00561	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 津田哲哉
2. 発表標題 有機イオン液体中での金属ナノ粒子の調製とその電極触媒への応用
3. 学会等名 熔融塩委員会 第210回定例委員会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小寺直人、津田哲哉、桑畑 進
2. 発表標題 金属有機構造体由来炭素への白金ナノ粒子担持とその電極触媒評価
3. 学会等名 電気化学会 第89回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiao, Qingning; Yao, Yu; Tsuda, Tetsuya; Kuwabata, Susumu
2. 発表標題 One-Pot Preparation of Pt Nanoparticle-Supported Graphene Nanoplatelets by Ionic Liquid-Pyrolysis Method
3. 学会等名 PRIME2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 肖 慶寧、姚 宇、津田哲哉、桑畑 進
2. 発表標題 ワンポットプロセスによるPtナノ粒子担持炭素材料の作製
3. 学会等名 第9回JACI/GSCシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Yao, Masafumi Kawaguchi, Reiko Izumi, Tetsuya Tsuda, and Susumu Kuwabata
2. 発表標題 Effects of carbon materials in Pt nanoparticle supported electrocatalysts prepared by one-pot ionic liquid pyrolysis method
3. 学会等名 2nd Nucleation and Growth Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Yao, Reiko Izumi, Tetsuya Tsuda, and Susumu Kuwabata
2. 発表標題 Impact of Ni Precursor Species on Pt-Ni Alloy Nanoparticles-Supported MWCNTs Composite Materials Prepared by One-Pot Process
3. 学会等名 第10回イオン液体討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肖 慶寧、姚 宇、津田哲哉、桑畑 進
2. 発表標題 イオン液体を用いたPtナノ粒子担持グラフェンの熱分解法によるワンポット作製
3. 学会等名 第10回イオン液体討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Yao, Reiko Izumi, Tetsuya Tsuda, and Susumu Kuwabata
2. 発表標題 Pt-Ni Alloy Nanoparticle-Supported MWCNT Electrocatalysts Prepared by One-Pot Pyrolytic Method in Ionic Liquids with Different Ni Precursors
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肖 慶寧、姚 宇、津田哲哉、桑畑 進
2. 発表標題 ワンポットプロセスによるPtナノ粒子担持炭素材料の作製
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大内幸雄（分担執筆(pp. 262-268) 津田哲哉、鳥本 司、桑畑 進)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 320
3. 書名 イオン液体の実用展開へ向けた最新動向	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室紹介ホームページ https://www.tp.chiba-u.jp/ms/laboratory/%e6%b4%a5%e7%94%b0%e7%a0%94%e7%a9%b6%e5%ae%a4/
--

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			
米国	University at Buffalo			