

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05685

研究課題名(和文) 酸性水溶液系リチウム-空気電池の開発

研究課題名(英文) Development of acidic aqueous lithium-air battery

研究代表者

今西 誠之 (Imanishi, Nobuyuki)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：20223331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：水溶液系リチウム空気電池は高い理論重量エネルギー密度を有する。この電池の正極は活物質である酸素分子と中性あるいは塩基性の水溶液電解質の組み合わせから構成される。大気中の二酸化炭素と水溶液との反応を防止するため、本研究では酢酸酸性水溶液を適用した。また、この酸性電解液に耐える固体電解質薄膜をテープキャスト法で作成した。本電池系の開回路電圧は約4Vを示した。また加圧下で電池を作動させることによって酢酸の揮発を抑制し電池は安定した充放電サイクル特性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の電池は正負極が共通の電解液を用いるものであるが、本研究では負極には負極専用の、正極には正極専用の電解液を用いる。異なる2つの電極系を組み合わせることは電池における材料選択の幅を広げるものであり、新しい電池を生み出す土壌になる。また、リチウム空気電池はリチウムイオン電池を大きく超えるエネルギー密度を発生する。多くの課題を有するが、この電池の実用化は電気エネルギーの利活用を大きく進展させ、新しい社会の創出につながるものである。

研究成果の概要(英文)：Lithium-air batteries with aqueous solution have a high theoretical gravimetric energy density. The cathode of this battery consists of a combination of oxygen molecules and a neutral or basic aqueous solution electrolyte. To prevent reactions between atmospheric carbon dioxide and aqueous solutions, acidic acetic acid solutions were applied in this study. Solid electrolyte thin films that can withstand this acidic electrolyte solution were prepared by the tape casting method. The open circuit voltage of this battery system was approximately 4 V. By operating the battery under pressure, it showed stable charge-discharge cycle characteristics because the acetic acid volatilization was suppressed.

研究分野：電気化学

キーワード：リチウム電池 金属空気電池 固体電解質 エネルギー密度 酸素還元反応 酸素発生反応 ペロプスカイト酸化物

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

化石燃料の枯渇とこれらの燃焼による二酸化炭素濃度増大が引き起こす温暖化はグローバルな問題として認識されている。対応策の一つとして電気エネルギーの効率的利用が考えられている。我が国では自動車等輸送機器から発生する二酸化炭素は排出量全体の 20%弱を占める。ガソリン代替燃料の開発や省エネルギー・クリーンエネルギーなどの新技術が積極的に開発されているが、現在主流となっているのは蓄電池によって駆動される電気自動車への転換である。我が国の「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」によれば本格的な電気自動車用蓄電池に求められる性能の目標値は重量エネルギー密度 700 Wh kg^{-1} と定められている。しかしながら、現在電気自動車用電池として利用されているリチウムイオン電池のシステム上の重量エネルギー密度は約 250 Wh kg^{-1} 程度が限界と考えられている。

この数値が示すように従来型のリチウムイオン電池を用いた場合、電気自動車の航続距離はガソリン車に比べて小さくなる。一台により多くの電池を搭載すれば航続距離は大きくなるが、車重の増、価格の増、室内空間の減など負の影響が大きくなる。ガソリン車から電気自動車に完全移行するには、 700 Wh kg^{-1} を見込めるような格段に大きなエネルギー密度を有する蓄電池の開発が必須であり、この目的に向けて世界各国で電池開発に鎧を削る競争が行われている。

2. 研究の目的

高エネルギー密度を達成しようとする場合、リチウムイオン電池のコンセプトをベースとした電池の改善によって実現を図る考え方もあるが、我々はリチウムイオン電池とは異なる原理で作動する電池の開発を目指した。本研究の対象として水系リチウム空気電池を選択した。この電池は負極に金属リチウム、正極に酸素分子を用いる。これらは溶解・析出型とも言うべき電極反応様式を示し、インサージョン反応を適用するリチウムイオン電池とは本質的に異なる。この電池は正極側に水溶液電解質を用いて約 3 V の開回路電圧を発生する。この状態であっても理論重量エネルギー密度が約 1900 Wh kg^{-1} とリチウムイオン電池を超えるエネルギー密度が達成可能である。しかし実際のエネルギー密度は水系空気電池に特有のセル部材の重量によって大きく低減する。この問題に対処するためには理論エネルギー密度を増大させることが有効である。その手段として開回路電圧を大きくする技術開発が必要である。本研究では水溶液電解質の pH を酸性側に偏らせることで空気極の電位上昇を導き、エネルギー密度を増大させることを目指した。具体的には酢酸酸性水溶液を用いた水系リチウム空気電池を作成し、その性能評価、課題の認識そしてその解決を目指した。

3. 研究の方法

酢酸水溶液リチウム空気電池は、負極にリチウム金属、正極電解質に酢酸電解液、負極と正極電解質の間に隔壁としてリチウムイオン導電性固体電解質 $\text{Li}_{1+x+y}\text{Al}_x(\text{Ti,Ge})_{2-x}\text{Si}_y\text{P}_{3-y}\text{O}_{12}$ (LATP) を使用した。負極側には有機電解液 $\text{Li}(\text{FSO}_2)_2\text{N}$ (LiFSI)-1,4-ジオキサン(DX)-1,2-ジメトキシエタン(DME) (1:2 v/v) を採用した。LATP は酸によってリチウムイオンとプロトンのイオン交換が起こるので、リチウムイオンの溶出が起こらないように酢酸リチウムを大量に酢酸電解液に溶解させた。また、酢酸電解液の蒸発を抑制する目的で 2 気圧の大気中かつ密閉容器中で電池を作動させた。予備的な実験では酢酸電解液の蒸発量を大幅に軽減できることが確認されている。

空気極には多孔質炭素材料である気相炭素繊維 (VGCF) またはケッチェンブラック (KB) を採用した。酸素酸化還元触媒には酸性水溶液中でも安定な白金担持カーボン (Pt-C) を採用した。Pt-C、炭素材料、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を少量の蒸留水を加えながら混合しローラープレスで引き延ばしてシート状に成型した。これを空気極として使用した。

電池の電気化学測定は試験の内容に応じて二電極式または三電極式試験セルによって行った。フルセルの充放電特性、サイクリックボルタメトリー、インピーダンス測定は二電極式、空気極のみの評価を行う場合は三電極式セルを用いた。フルセルの定電流充放電のサイクル特性を評価する場合の条件の一例を以下に示す。

測定温度 : $25 \text{ }^\circ\text{C}$

電流密度 : $0.07, 0.17, 0.3, 0.5, 1.0 \text{ mA/cm}^2$

測定時間 : 放電 5 h、充電 5 h、休止 5 h or 1 h

4. 研究成果

< 空気極触媒の開発 >

水系リチウム空気二次電池の空気極では、空気中に大量に存在する酸素を活物質として充電時には酸素発生反応 (Oxygen Evolution Reaction ; OER) 放電時には酸素還元反応 (Oxygen Reduction Reaction ; ORR) を行う。空気極に関しては、電解液の揮発、空気中の二酸化炭素と電解液の反応、過電圧が大きいといった問題がある。揮発に対しては高圧雰囲気への適用、二酸化炭素との反応については酸性水溶液の適用によって問題を低減することが可能と考えられる。特に過電圧の問題はエネルギー密度に直結するので、高い OER 及び ORR 活性を持つ触媒の開

発は重要である。本研究ではコスト、電気化学安定性の観点から金属酸化物を対象として触媒の開発に取り組んだ。ペロブスカイト酸化物には優れた触媒能と電子導電性を持つ材料が多い。このペロブスカイト構造を含む Ruddlesden-Popper(RP)相は $A_{n+1}B_nO_{3n+1}$ で表わされ、ペロブスカイト構造の間に岩塩層が挿入された層状構造をとる。岩塩層中には酸素が容易に取り込まれ、塩基性溶液中では電気化学的に O^{2-} が出入りすることが報告されている[1]。我々が行った先行研究より、オキシ水酸化物の RP 相である $Sr_3Co_2O_5(OH)_2 \cdot 2H_2O$ が高い触媒活性を示すことが見いだされている[2]。この材料の B サイトに Fe を置換した $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ の触媒活性評価とその機構解明に着目して研究を行った。

RP 相の $Sr_3Fe_xCo_{2-x}O_{7-6}$ ($x=0-1.0$) の単一相を固相法により合成し、これを空気中に保持することで水和させて $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ を合成した。大気中からの水分子の吸収は湿度・気温に依存すると考えられ、再現性に課題はあるが、X 線回折測定により得られた格子定数から、a 軸は Fe 置換と共にわずかに伸長、b 軸は $x=0.6$ までは伸長しその後縮小、c 軸は a 軸と同様に Fe 置換と共に伸長した。単位格子の体積は $x=0.6$ を頂点にその前後では収縮する挙動であった。 $Sr_3Fe_xCo_{2-x}O_{7-6}$ が水分を吸収し $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ に変化しても粒子形状に変化は観察されない。粒度分布測定によれば試料は粒径が整っており、Fe 置換による差は見られなかった。BET 法による比表面積も Fe 置換による大きな差は見られなかった。

合成した RP 相の触媒活性評価として、回転ディスク電極を用いたサイクリックボルタンメトリー (CV) 測定を行った。

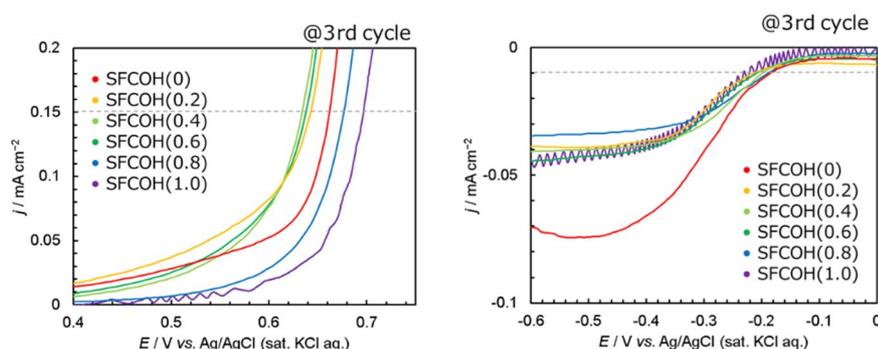


図 1 $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ の CV (左 anodic, 右 cathodic スキャンの拡大図)

図 1 に示すように酸素発生反応(OER)において同じ電位における電流密度は Fe の置換により変化しており $x = 0.6$ まで増大して極大値をとり、それ以上の Fe 置換では逆に電流密度が減少した。この事実が示すことは Fe を置換すると OER 活性が向上し、 $x = 0.2-0.6$ の領域で特に高い活性を現すことである。Fe 置換量の変化にかかわらず立ち上がり電位に変化は見られなかったことから、酸素還元反応の機構自体は変化しておらず、 $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ の触媒作用によって反応の速度が向上したと考えられる。

Fe 置換することで RP 相の $Sr_3Fe_xCo_{2-x}O_{7-6}$ の c 軸が伸張することと電気化学的活性に相関性が見られることから、反応速度の向上は結晶構造が原因となっていると考えられる。水和した $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ も同様に c 軸方向に層間距離が増大し、層間に水分子や水酸化物イオンが脱挿入すると予想される。この場合、触媒粒子の表面だけでなくバルク中に化学種が存在できるようになる。つまり反応サイトの増加によって OER 活性が増強されたと考えられる。 $x = 0.6$ 以降は構造内に吸収された水分子が過剰に存在することで結晶構造が乱れた可能性がある。また、 $Sr_3Fe_{2-x}Co_xO_5(OH)_2 \cdot xH_2O$ には Fe と Co があり、それぞれ OER 反応の役割分担をするデュアルサイトメカニズムが提案されている。Fe と Co の比が 1:1 に近いところで触媒能の極大が発現することから、この説の通り Co のみの場合よりも OER の過電圧が小さくなったと考えることもできる。

一方、還元反応である ORR 側の電流値は OER に比べてはるかに低く、この触媒は ORR 活性に乏しいことがわかった。Co のみの場合に最も大きな電流密度が得られており、Fe を少量置換しただけで電流値が大きく低減し、その過電圧は Fe 置換量にはあまり依存しない。本研究で取り上げた RP 相は酸素発生触媒として優れているが二元機能型とはいえ、還元側の特性向上には ORR 専用の触媒の併用が必要である。

< リチウムイオン導電性固体電解質の開発 >

セラミックス固体電解質は $Li_{1-x}Al_xTi_{2-x}(PO_4)_3$ (LATP), $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ (LLZ), $Li_{3x}La_{2/3-x}TiO_3$ (LLTO) などが代表的で常温でも $10^{-4} \sim 10^{-3}$ S/cm 程度のリチウムイオン導電率を有している。リチウムイオンを含むセラミックス固体電解質は一般的に水に対して不安定であるが NASICON(Na Super Ion Conductor)型結晶構造をもつ固体電解質である LATP 系の電解質は例外的に水に対して安定であることから水系リチウム空気二次電池に用いる候補として優れている[3]。本研究では水系リチウム空気二次電池の基幹材料である固体電解質の性能を向上させ

ることを目標とした材料開発を行った。特にイオン導電性の向上は電池の内部抵抗低減に直結する重要課題である。本研究では LiCl を $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ge}_{0.2}\text{Ti}_{1.4}(\text{PO}_4)_3$ (LAGTP) 中に導入することによって Epoxy 樹脂含浸時のリチウムイオン導電率の低下抑制を図った。さらに、機械的強度向上のために系内へ TiO_2 の添加を行った。これらの知見を基に LAGTP-LiCl-epoxy- TiO_2 のテープキャスト法での電解質薄膜試料を作成した。

LAGTP-LiCl-epoxy- TiO_2 のグリーンシートの焼成条件についての検討を行った。 TiO_2 10 wt.% 添加、 90°C 、200 MPa の加圧後に 950°C 、7h 焼成を行った試料は 159.0 Nmm^{-2} の高い 3 点曲げ試験強度を示した。 TiO_2 添加量の最適化を行ったところ、機械的強度は TiO_2 添加量 10 wt.% の際に最も高い値を示し、リチウムイオン導電率は 5 wt.% の際に $4.9 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$ の高いイオン導電率を示した。強度および導電率のどちらについても TiO_2 添加量に対する極値が存在し、過不足あれば十分な性能が得られなかった。 TiO_2 は LAGTP に一部固溶せず結晶粒子間に存在する。 TiO_2 は絶縁体であるが、少量であれば LiCl の他 $\text{Li}(\text{TiO})\text{PO}_4$ などの不純物と共に結晶粒子同士を強く結びつけると考えられる。 TiO_2 を 10 wt.% 添加した試料は最も高い機械的強度を示し、イオン導電率も $4.6 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$ と高い値を示し、機械的強度とイオン導電率の双方を満足する。

次に塩化リチウムのイオン導電率への影響を調査した。結果を表 1 に示す。epoxy は固体電解質内部を液体が透過することを防ぐために含浸させるが、これによって導電率は一桁近く低下する [4]。しかし、LiCl を 3.0wt.% 添加することにより $8.7 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$ の高いイオン導電率が得られる。塩化リチウム含有量が多いほどイオン導電率が高くなる傾向が見られ、結晶粒子間に存在する LiCl がイオン導電性のパスを形成していることが示唆される。この試料のイオン導電率は試料作成時の湿度の影響を強く受け、ドライボックス中で作成した試料の導電率は LiCl 無添加品とほぼ同じであった。一方、大気中で作成した試料は LiCl 添加による導電率の向上が観測された。潮解性をもつ LiCl が大気中の水分子により水和し、LAGTP の焼結体内部で解離状態となりイオン導電パスを形成していると考えられる。

表 1 LAGTP-10wt% TiO_2 -epoxy 系における LiCl 添加量のイオン導電率への影響

組成	総合導電率 (Scm^{-1})	粒内導電率 (Scm^{-1})	粒界導電率 (Scm^{-1})
LAGTP-10wt% TiO_2	8.9×10^{-4}	2.7×10^{-3}	1.3×10^{-3}
LAGTP-10wt% TiO_2 -epoxy	3.7×10^{-4}	1.1×10^{-3}	5.6×10^{-4}
LAGTP-10wt% TiO_2 -epoxy-LiCl 1.2wt%	4.6×10^{-4}	1.7×10^{-3}	9.6×10^{-4}
LAGTP-10wt% TiO_2 -epoxy-LiCl 3.0wt%	8.7×10^{-4}	1.9×10^{-3}	1.6×10^{-3}

LAGTP- TiO_2 -LiCl に epoxy 樹脂を含浸させた試料は水溶液系電解液に浸漬しても 30 日にわたってイオン導電率の変化は認められず、液体の不透過性が確認された。epoxy 樹脂が表面の細孔を塞ぐことにより水不透過性を発揮し、LiCl の電解液中への溶出を防いでいると考えられる。最終的に水系リチウム空気電池の隔膜として作成した LAGTP-3.0 wt% LiCl-epoxy-10 wt.% TiO_2 は、室温で $8.7 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$ のイオン導電率と 159.0 Nmm^{-2} の機械的強度、耐水安定性、水不透過性を示す隔膜として達成された。

<フルセルのリチウム空気電池特性の検討>

電解液が塩基性の場合には空気極の放電反応生成物として水酸化リチウム (LiOH) が生成し、空気中の二酸化炭素と反応し放電特性を低下させる [5]。本研究はエネルギー密度の向上を目標として正極側に酸性水溶液の適用を行う。酸性水溶液は空気中の二酸化炭素の侵入・酸塩基反応を低減するので、充放電の長寿命化が期待できる。しかし酸性度が強すぎると LAGTP 中のリチウムイオン (Li^+) と電解液中のプロトン (H^+) が交換して LAGTP のイオン導電率が低下する [6]。一方低濃度の酸水溶液では放電反応の途中で中性さらには塩基性に変化し二酸化炭素との反応が起こりやすくなるので、酸性度の適切な設定が必須である。こうした要件と式量が小さく比較的安価という点から酢酸に注目した。さらに本研究では加圧することで酢酸電解液の蒸発を抑制し酢酸系リチウム空気二次電池の実用性を高める工夫を施した。

空気極は触媒、カーボン材料、結着剤の 3 種類で構成される。空気極の作成にあたり最適な構成を探索した。本研究では触媒として RP 相を開発したが、酢酸中の安定性の評価には至っていないので、触媒を白金担持カーボン (Pt-C) に統一し、カーボン材料の種類や構成重量比等の最適化を行った。結着剤にはポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を用いた。カーボン材料に気相法炭素繊維 (VGCF) を用いた際は、重量比が Pt-C : VGCF : PTFE = 5 : 3 : 2 で構成した空気極が最も良い性能を示した。また、導電助剤にケッチェンブラック (KB) を用いた際は、重量比が Pt-C : KB : PTFE = 5 : 2 : 3 で構成した空気極が最も良い性能を示した。これら二つの空気極の特性を比較したところ、導電助剤に VGCF を用いた空気極の方が電極反応を促進し過電圧が小さいことが分かった。以上より、酢酸系リチウム空気二次電池における空気極には一般に

用いられる KB より VGCF で構成した空気極が適していた。

上記の空気極を用いてフルセルを組み、電池性能の評価を試みた。開回路電位は約 3.9 V と水を用いた電池としては異常に高く、空気極に酸性水溶液を適用した効果が確認された。図 3 に電流密度 0.07 mA cm^{-2} で行ったフルセルの定電流充放電測定の結果を示す。30 サイクル(800 h) 以上の安定した充放電サイクルが達成された。しかし、30 サイクル時のエネルギー損失は、5 サイクル時に比べて約 11 % 増大した。加圧によって酢酸の揮発が抑制されてはいるものの、長時間の充放電では電解液が次第に蒸発し、空気極と電解液との接触面積が減少したと考えられる。電解液の損失を防ぐ更なる手段として空気極の大気側の面に撥水性カーボンペーパーを取り付けた。これにより酢酸電解液が大気側に過度に浸潤する機会が低減すると推定された。結果として同条件下で過電圧の大きさは初期の状況を維持するようになった。

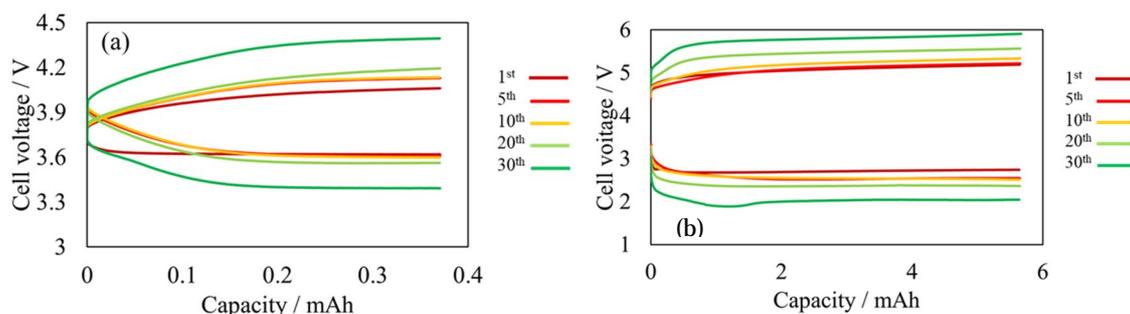


図 2 Li | 1 M LiFSI in DX-DME (1 : 2 v/v) | LTP | AcOH + H₂O sat. LiAc (9 : 1 v/v) | air, (Pt-C-VGCF-PTFE)

(a) 電流密度 0.07 mA cm^{-2} での定電流充放電測定, (b) 撥水性カーボンペーパー利用 . 電流密度 1.0 mA cm^{-2} での定電流充放電測定

撥水性カーボンペーパーを導入した空気極を用いてフルセルを組み、より大きい電流密度 1.0 mA cm^{-2} で定電流充放電サイクル試験を行った。この電流密度においても 30 サイクル以上安定したサイクルが達成された。しかし、放電及び充電の過電圧はどちらも大きく増大することが判明した。酸性水溶液を用いたリチウム空気電池は高い電圧で大きなエネルギー密度を稼ぐことができる魅力的な電池システムであるが、現状では内部抵抗が大きいことが示された。過電圧の発生要因を明らかにし、これを低減することが今後の課題である。

引用文献

- [1] T. Nakamura, *Electrochemistry*, **85**, 552 (2017).
- [2] H. Sonoki, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto, and N. Imanishi, *Chem. Commun.*, **55**, 7454 (2019).
- [3] Y. Shimonishi, A. Toda, T. Zhang, A. Hirano, N. Imanishi, O. Yamamoto, Y. Takeda, *Solid State Ionics*, **183**, 48 (2011).
- [4] K. Takahashi, P. Johnson, N. Imanishi, N. Sammes, Y. Takeda, O. Yamamoto, *J. Electrochem. Soc.*, **159**, A1065 (2012).
- [5] S. Sunahiro, M. Matsui, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi, *Journal of Power Sources*, **262**, 338 (2014).
- [6] S. Hasegawa, N. Imanishi, T. Zhang, J. Xie, A. Hirano, Y. Takeda, O. Yamamoto, *J. Power Sources*, **189**, 371 (2009).

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 5件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 S. Ichida, D. Mori, S. Taminato, T. Zhang, Y. Takeda, O. Yamamoto and N. Imanishi	4. 巻 4
2. 論文標題 A Rechargeable Aqueous Lithium-Air Battery with an Acetic Acid Catholyte Operated at High Pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Technology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21926/jept.2201009	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 該当する
1. 著者名 H. Minami, H. Izumi, T. Hasegawa, F. Bai, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi	4. 巻 3
2. 論文標題 Aqueous Lithium--Air Batteries with High Power Density at Room Temperature under Air Atmosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Technology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21926/jept.2103041	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 T. Mizoguchi, H. Sonoki, E. Niwa, S. Taminato, D. Mori, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi	4. 巻 369
2. 論文標題 K ₂ NiF ₄ type Ln ₂ -xSrxNiO _{4+delta} (Ln = La and Pr; x = 0-0.14) as an oxygen electrocatalyst for aqueous lithium-oxygen rechargeable batteries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Solid State Ionics	6. 最初と最後の頁 115708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssi.2021.115708	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 N. Imanishi, T. Zhang, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Lithium Metal Anode for High-Power and High-Capacity Rechargeable Batteries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Technology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21926/jept.2102019	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 該当する

1. 著者名 H. Takagi, K. Kakimoto, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi	4. 巻 3
2. 論文標題 High Energy Density Rechargeable Aqueous Lithium Batteries with an Aqueous Hydroquinone Sulfonic Acid and Benzoquinone Sulfonic Acid Redox Couple Cathode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Technology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21926/jept.2101010	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 S. Soga, F. Bai, T. Zhang, K. Kakimoto, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi	4. 巻 167
2. 論文標題 Ambient Air Operation Rechargeable Lithium-Air Battery with Acetic Acid Catholyte	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	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) 10.1149/1945-7111/ab86c4	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 該当する

1. 著者名 F. Bai, K. Kakimoto, X.F. Shang, D. Mori, S. Taminato, M. Matsumoto, Y. Takeda, O. Yamamoto, H. Minami, H. Izumi, N. Imanishi	4. 巻 8
2. 論文標題 Synthesis of NASICON-type Li _{1.4} Al _{0.4} Ge _{0.2} Ti _{1.4} (P _{0.4}) ₃ solid electrolyte by rheological phase method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Ceramic Societies	6. 最初と最後の頁 476-483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21870764.2020.1750103	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 該当する

1. 著者名 F. Bai, K. Kakimoto, X. Shang, D. Mori, S. Taminato, M. Matsumoto, Y. Takeda, O. Yamamoto, H. Izumi, H. Minami, N. Imanishi	4. 巻 8
2. 論文標題 Water-Stable High Lithium-Ion Conducting Solid Electrolyte of Li _{1.4} Al _{0.4} Ge _{0.2} Ti _{1.4} (P _{0.4}) ₃ -LiCl for Aqueous Lithium-Air Batteries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Energy Research	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) 10.3389/fenrg.2020.00187	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河野晴太、園木秀聡、田港聡、森大輔、武田保雄、今西誠之
2. 発表標題 鉄コバルト系 Ruddlesden-Popper 相空気極触媒の合成および活性評価
3. 学会等名 2021年電気化学会 東海支部-東北支部合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市田就真、森大輔、田港聡、武田保雄、山本治、今西誠之
2. 発表標題 リチウム - 酢酸空気二次電池の開発
3. 学会等名 2021年電気化学会 東海支部-東北支部合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柿本 晃一、Fan Bai、森 大輔、田港 聡、泉 博章、南 浩成、武田 保雄、山本 治、今西 誠之
2. 発表標題 NASICON 型 $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{10.4}\text{Ge}_{0.2}\text{Ti}_{1.4}(\text{P}_0\text{O}_4)_3\text{-LiCl-epoxy-TiO}_2$ リチウムイオン導電性固体電解質の特性
3. 学会等名 第61回電池討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木宏規、田港聡、森大輔、山本治、今西誠之
2. 発表標題 水溶性キノンをを用いたリチウム二次電池
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 H. Takagi, O. Yamamoto, K. Kakimoto, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, and N. Imanishi
2. 発表標題 Rechargeable Aqueous Lithium Batteries with a Hydro- Quinone Sulfonic Acid Potassium Salt and Benzoquinone Sulfonic Acid Potassium Salt Redox Couple
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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	田港 聡 (Taminato Sou) (60771201)	三重大学・工学研究科・助教 (14101)	

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