

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03048

研究課題名(和文) 固体電気化学反応に基づいたナノ材料の機能創出とエネルギー科学への展開

研究課題名(英文) Nanomaterials based on solid-state electrochemistry

研究代表者

吉川 浩史 (Yoshikawa, Hirofumi)

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：60397453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、環境問題やエネルギー問題などから、新しいエネルギー材料の開発が急務となっている。中でも高性能な蓄電機能を有する物質の開拓は、重要な研究課題の1つである。本研究では、より高い容量とエネルギー密度を有する二次電池の実現を目指して、金属イオンと酸化還元活性な有機配位子から成る多電子酸化還元活性『金属有機構造体(Metal-Organic Framework: MOF)』を新たに創製し、これを正極材料とすることで、金属イオンと有機配位子両方の酸化還元によるより大きな容量とMOFの強固な多孔性構造に基づいた安定なサイクル特性を実現する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、多電子の酸化還元活性を示す金属有機構造体(MOF)を多数創製し、それらを正極とするリチウム電池の特性が従来のリチウムイオン電池よりも良いことを見出した。これまでに、酸化還元活性な配位子を有するMOFの電池特性は調べられておらず、学術的に非常に意義のある成果である。また、それらの電池反応機構を調べる過程で、デュアルイオン電池機構や電気化学的な動的S-S共有結合を見出すなど、次世代電池に必要な新しい原理現象を見出せた点でも非常に意義がある。なお、これらの新しい原理現象を基にした高性能な蓄電デバイスが実現できれば、産業界へのインパクトも含め、社会的に大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：Recently, there is an urgent need to develop new energy materials due to environmental and energy problems. Among of them, development of substances with high-performance electric storage function is one of the important research subjects. In this study, aiming at the realization of a secondary battery with higher capacity and energy density, we synthesized multi-electron redox active Metal-Organic Framework, which consists of metal ions and redox-active organic ligands and used it as a positive electrode material. As a result, a larger capacity due to redox of both metal ions and organic ligands and stable cycle characteristics based on robust porous structure of MOF were achieved.

研究分野：電気化学

キーワード：金属有機構造体 固体電気化学反応 XAFS 二次電池

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の発展に向け、電気エネルギーと化学エネルギーを相互に変換・貯蔵する電気化学デバイスの存在は極めて重要である。我々は、このような社会的命題のもと、遷移金属酸化物ではない正極活物質を利用した高容量な二次電池デバイスの実現および固体電気化学反応を利用した新奇物性開拓について、固体電気化学と物性化学の境界領域で研究を行ってきた。前者については、高容量と急速充電の両方を可能にする新しい正極材料として、多電子レドックス特性を示す多核金属錯体分子(分子クラスター)を用いた新しいリチウム二次電池「分子クラスター電池」を独自に開発し、分子クラスターが固体電気化学反応特有の数十電子にもおよぶ酸化還元を示すことで、従来のリチウムイオン電池よりも大きな電池容量を示すことを明らかにした。この知見を基に、より大きな容量と安定なサイクル特性を実現するため、ごく最近、申請者は上述のクラスターと酸化還元活性な有機配位子(キノンなど)から成る多電子レドックス金属有機構造体(Metal-Organic Framework: MOF)を創製し、これを正極材料とすることで、有機配位子と金属イオン両方の酸化還元による高容量とMOFの強固な空孔構造に由来した安定なサイクル特性を実現しつつある。これまでにMOFを二次電池の正極材料とした例はあるものの、多電子レドックスMOFを用いたのは申請者が初めてであり、高性能な蓄電特性という点で今後の展開が期待される。

一方で、我々は、上記のような高性能な新しい二次電池の開発研究と並行して、固体電気化学反応を利用した新奇物性開拓研究も精力的に行ってきた。例えば、磁性錯体の一種であるプルシアンブルー類似体について、固体電気化学反応により、通常の化学合成では得られない酸化還元状態とスピン状態を有する化学種を連続的に創製し、*in situ* 磁気測定システムを用いることで、そのフェリ磁性転移温度が150~230 Kの広い領域で連続的に変化することを観測している。さらに、対象物質を金属酸化物へと広げることで、マグネタイトナノ粒子の場合に、電圧の変化だけで室温磁気スイッチングを示すことを見出し、新たなデバイスへの展開が期待される。

2. 研究の目的

このように、我々がこれまで行ってきた固体電気化学反応に基づく機能開拓研究を基に、分子、分子集合体、金属酸化物ナノ粒子といった様々なナノ材料を対象に、次世代二次電池として実用化されるような性能を有する蓄電デバイスの開発研究と固体電気化学反応を利用した新奇物性開拓による新しいエネルギーデバイス創製研究を行い、基礎(新現象・原理)と応用の両面で学術および社会に貢献することを目的とする。ここでは、主に、蓄電デバイスの開発研究に関する成果について述べる。

3. 研究の方法

新しい二次電池正極材料として、酸化還元活性な配位子を含む金属有機構造体(MOF)の創製を試みた。具体的には、酸化還元活性な配位子として、2電子の酸化還元反応を示すキノン部位を有するアントラキノンジカルボン酸配位子や同じく2電子の酸化還元反応を示すジスルフィド部位を含む配位子を用いることにより、新たな多電子レドックスMOFを創製し、その電池特性を検討した。とりわけ、ジスルフィドは、従来の正極活物質の約10倍の理論容量を示す硫黄の基本骨格であるが、その電気化学反応は、放電時におけるS-S結合の開裂のため、サイクル特性が低く、S-S結合の可逆な酸化還元反応を実現することが重要と考えられている。

まず、アントラキノンジカルボン酸(AQDC)をCuイオンやMnイオンと反応させることにより、新しいレドックスMOFを得るとともに、その単結晶X線結晶構造解析やそれらを正極活物質とするリチウム電池を作成し、充放電特性を計測した。さらに、反応機構を解明するために、X線吸収微細構造(XAFS)分析を行った。

一方で、ジスルフィドMOF(DS-MOF)については、5種類のDS-MOF(図1)：

[Co(NCS)₂(4dpds)₂]_n (1D-DS-Co-MOF)、
 [Cu(C₂O₄)(4dpds)]_n (2D-DS-Cu-MOF)、
 [Mn₂(6dtba)₂(H₂O)₂]_n (3D-DS-Mn-MOF 1)、 [Cu₄(HCO₂)₆(OH)₂(4dpds)₂]_n (1D-DS-Cu-MOF)、
 [Mn₅(2dtba)₄(μ³-OH)₂]_n (3D-DS-Mn-MOF 2)を空孔体積により分類するとともに、これらを正極活物質とするリチウム電池の電気化学測定を行い、電気化学特性と構造的特徴の相関を検討した。さらに、XAFS分析より、DS-MOFの充放電反応機構解明を行った。

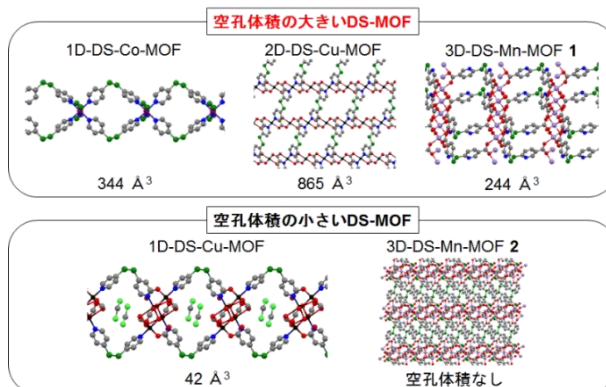


図1、DS-MOFの構造と分類

4. 研究成果

まず、AQDC の系について述べる。銅イオンと反応させることにより、新規 MOF である $[\text{Cu}(2,7\text{-AQDC})(\text{DMF})]_{\infty}$ (Cu-MOF) を得た。図 2 は、単結晶 X 線構造解析の結果、明らかとなった Cu-MOF の構造である。これより、2,7-H₂AQDC の 2,7 位のカルボキシレートが Paddle wheel 型 Cu 二核錯体間を架橋して二次元シートを形成し (図 2(a))、それがアントラキノン部位の π - π スタッキングにより積層して、直径約 2 nm の空孔を有する三次元構造を持つことが明らかとなった (図 2(b))。

この Cu-MOF を正極活物質とする Li 電池を作製し、定電流充放電測定を行った。図 3(a) は充放電曲線であり、充電曲線、放電曲線ともに、3.0V 付近および 2.5V 以下の 2 段階のプラトーを示すことが分かった。1 サイクル目の放電容量は、2.0~4.0 V の電圧範囲で約 120 Ah/kg であり、図 3(b) に示すように、50 回以上のサイクルでも容量がほぼ落ちない安定なサイクル特性が見られた。なお、電圧範囲を 1.7V まで下げることにより、容量は従来の Li イオン電池に匹敵する 150Ah/kg を示すものの、サイクル特性は非常に悪かった。

この Cu-MOF 電池の反応機構を検討するため、電池放電中の正極の Cu K-edge XAFS 測定を行った。その結果、Cu-MOF の二次元シート中の Cu 二核錯体において、当初、すべて Cu(II) であったものが、段階的に還元されて Cu(II)-Cu(I) になり、その後、すべての Cu イオンが +1 価になるという機構が考えられた。なお、2.5V 以下では XANES スペクトルに変化は見られず、Cu イオンの価数変化は起こっていないことが明らかとなった。このことより、4.0 から 2.0V の放電曲線において、最初のプラトー (3.0V 付近) は Cu イオンの +2 から +1 への還元由来すると考えられ、2 つ目のプラトー (2.5V 以下) では配位子であるアントラキノンが 1 電子の還元をすることによって、得られた容量 (120Ah/kg) を説明することができることが分かった。2.0V よりも電圧を下げた場合には、このアントラキノンのもう 1 電子の還元により、150Ah/kg を示すが、これは不可逆な反応であると考えられた。なお、配位子 (2,7-H₂AQDC) のみの電池特性についても検討を行ったところ、容量、サイクル特性ともに低く、MOF の強固な構造安定性と空孔を有する性質が Cu-MOF の電池特性の安定性につながっていることが明らかとなった。

次に、2,7-H₂AQDC および 2,6-H₂AQDC を Mn イオンと反応させることにより、新規 Mn-MOF ($[\text{Mn}^{\text{II}}_7(2,7\text{-AQDC})_6(2,7\text{-AQDC})(\text{DMA})_6]_{\infty}$, DMA: N, N-dimethylacetamide) を作製した。図 4(a) は、この Mn-MOF の構造であるが、これより、Mn₇ 核クラスターがアントラキノンジカルボン酸により架橋された三次元構造を有し、1 次元チャネルが形成されていることが分かる。これを正極活物質とする二次電池を作製し、その電池特性を測定したところ、図 4(b) に示すように、1 サイクル目の充電過程で 70Ah/kg、そ

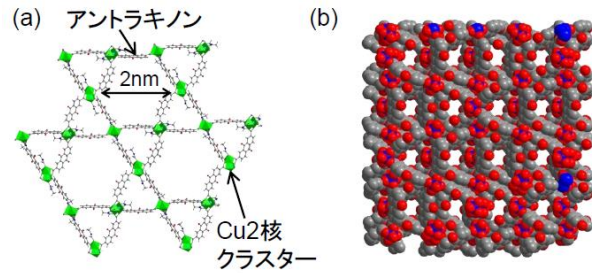


図 2、(a) Cu-MOF の二次元シート構造、
(b) Cu-MOF の三次元構造

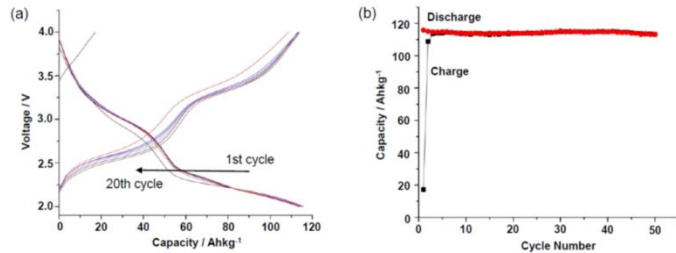


図 3、(a) Cu-MOF 電池の充放電曲線、(b) Cu-MOF 電池のサイクル特性

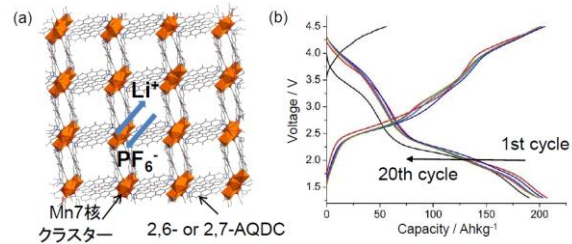


図 4、(a) Mn-MOF の構造、(b) Mn-MOF 電池の充放電曲線

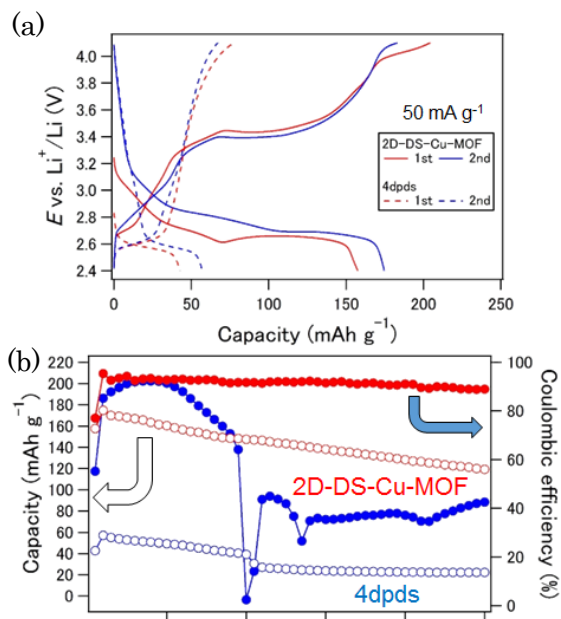


図 5、(a) 2D-DS-Cu-MOF の充放電曲線
(b) サイクル特性

の後の充放電過程では、2段階のプラトーを示しながら 200 Ah/kg の充放電容量を安定に示すことが明らかとなった。これについて、電池充放電中の Mn K-edge XAFS を測定したところ、高い電圧のプラトーは $\text{Mn}^{2+} \rightleftharpoons \text{Mn}^{3+}$ の酸化還元反応に、低い電圧のプラトーはアントラキノンの2電子の酸化還元に帰属でき、これにより充放電容量を説明できることが分かった。さらに、電池充放電中の粉末 X 線回折測定を行い、回折ピークの変化から、充電過程で Mn^{2+} イオンが酸化されるとともに、電解液中の PF_6^- イオンがチャンネルに取り込まれて1次元チャンネルの幅が大きくなると考えられた。なお、このような充電過程における PF_6^- イオンの取り込みは、 ^{19}F 固体 NMR から示唆され、Mn-MOF 電池が、 PF_6^- イオンと Li^+ イオンの両方が関与するデュアルイオン電池であることを明らかにした。このような反応機構を有する電池は報告例が少なく、高いクローン効率や様々な電解質を利用できるという点で非常に有利である。

一方で、DS-MOF の系については、空孔体積の分析より、有効空孔体積の大きい 1D-DS-Co-MOF (一次元構造、344 Å)、2D-DS-Cu-MOF (二次元構造、865 Å)、3D-DS-Mn-MOF 1 (三次元構造、244 Å) と有効空孔体積の小さい 1D-DS-Cu-MOF (一次元構造、42 Å) と 3D-DS-Mn-MOF 2 (三次元構造、空孔なし) に分類した(図 1)。有効空孔体積の大きい 2D-DS-Cu-MOF は、S-S 結合と金属イオンの酸化還元反応に基づく理論値に近く、配位子単独よりも大きい容量を示した(図 5)。1D-DS-Co-MOF と 3D-DS-Mn-MOF 1 についても同様の結果が得られ、空孔体積の大きい DS-MOF では電解質イオンが挿入されやすく、金属イオンと S-S 結合の酸化還元反応が起きたことが示唆された。また、構造の次元性が高いほどよいサイクル特性を示す傾向を見出し、次元性が高いほど放電後でも活物質が電解液に溶けにくく、三次元構造の DS-MOF が最も安定なサイクル特性を示した。一方で、空孔体積の小さい DS-MOF では、電解質イオンが挿入されにくいため、金属イオンと S-S 結合の酸化還元反応がほとんど起こらず、理論値の 4 分の 1 以下の容量しか得られなかった。

さらに、S K-edge XAFS 測定により、充放電過程において 2D-DS-Cu-MOF に含まれる S-S 結合の開裂/再結合が可逆に起きることを明らかにした(図 6)。同様に、1D-DS-Co-MOF と 3D-DS-Mn-MOF 1 でも S-S 結合の可逆な開裂/再結合が観測された。これは、DS-MOF 特有の電気化学的動的 S-S 結合であり、本研究で初めて見出した現象である。また、金属イオンの K-edge XAFS 測定によって金属イオンの価数変化も可逆であることがわかった。なお、空孔体積の小さい DS-MOF では、S-S 結合と金属イオンの酸化還元反応が不十分だった。以上より、空孔体積の大きい DS-MOF の電気化学的動的 S-S 結合と金属イオンの可逆な酸化還元反応により、高容量と安定なサイクル特性を実現した。

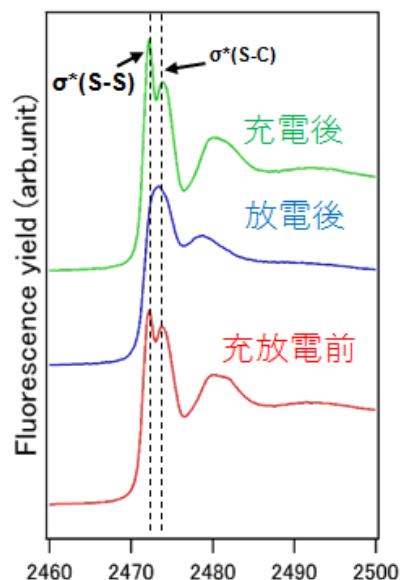


図 6、充放電過程における 2D-DS-Cu-MOF の S K-edge XANES スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Takeshi Shimizu, Heng Wang, Daiju Matsumura, Kei Mitsuhashi, Toshiaki Ohta, and Hirofumi Yoshikawa | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Porous Metal Organic Frameworks Containing Reversible Disulfide Linkages as Cathode Materials for Li-Ion Batteries | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ChemSusChem | 6. 最初と最後の頁 2256-2263 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cssc.201903471 | 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 Haruka Omachi, Tsukasa Inoue, Shuya Hatao, Hisanori Shinohara, Alejandro Criado, Hirofumi Yoshikawa,* Zois Syrgiannis, Maurizio Prato | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Concise, Single-step Synthesis of Sulfur-enriched Graphene: Immobilization of Molecular Clusters and Battery Applications | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Angew. Chem. Int. Ed. | 6. 最初と最後の頁 7836-7841 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201913578 | 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 Zhenxin Zhang, Heng Wang, Hirofumi Yoshikawa, Daiju Matsumura, Syuya Hatao, Satoshi Ishikawa, Wataru Ueda | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Zeolitic vanadomolybdates as high performance cathode-active materials for sodium ion battery | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces | 6. 最初と最後の頁 6056-6063 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b19808 | 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 Kensuke Nakashima, Takeshi Shimizu, Yoshinobu Kamakura, Akira Hinokimoto, Yasutaka Kitagawa, Hirofumi Yoshikawa and Daisuke Tanaka | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 A new design strategy for redox-active molecular assemblies with crystalline porous structures for lithium-ion batteries | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Science | 6. 最初と最後の頁 37-43 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SC04175C | 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 Yoshinobu Kamakura, Pondchanok Chinapang, Shigeyuki Masaoka, Akinori Saeki, Kazuyoshi Ogasawara, Shigeto R. Nishitani, Hirofumi Yoshikawa, Tetsuro Katayama, Naoto Tamai, Kunihiisa Sugimoto and Daisuke Tanaka | 4. 巻 142 |
| 2. 論文標題 Semiconductive Nature of Lead-Based Metal-Organic Frameworks with Three-Dimensionally Extended Sulfur Secondary Building Units | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc. | 6. 最初と最後の頁 27-32 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b10436 | 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 Y. Kamakura, N. Hosono, A. Terashima, S. Kitagawa, H. Yoshikawa, D. Tanaka | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 Atomic Force Microscopy Study of the Influence of the Synthesis Conditions on the Single-Crystal Surface of Interdigitated Metal-Organic Frameworks | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 ChemPhysChem | 6. 最初と最後の頁 2134-2138 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cphc.201800439 | 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. Oda, T. Shimizu, T. Katayama, H. Yoshikawa, T. Hatakeyama | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Tetracoordinate Boron-Fused Double [5]Helicenes as Cathode Active Materials for Lithium Batteries | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Org. Lett. | 6. 最初と最後の頁 1770-1773 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.9b00337 | 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 Takeshi Shimizu, Heng Wang, Naoki Tanifuji, Daiju Matsumura, Masashi Yoshimura, Koji Nakanishi, Toshiaki Ohta, Hirofumi Yoshikawa | 4. 巻 47 |
| 2. 論文標題 Reversible Batteries Based on Stable Redox Reactions of Disulfide Included in a Metal-Organic Framework as Ligands | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Chem. Lett. | 6. 最初と最後の頁 678-681 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.180121 | 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 Heng Wang, Jin Isobe, Daiju Matsumura, Hirofumi Yoshikawa | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 In situ X-ray Absorption Fine Structure studies of amorphous and crystalline polyoxovanadate cluster cathodes for lithium batteries | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Solid State Electrochemistry | 6. 最初と最後の頁 2067-2071 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10008-018-3920-4 | 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 Takeshi Shimizu, Koji Yamamoto, Palash Pandit, Hirofumi Yoshikawa, Shuhei Higashibayashi | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Application of Hydrazine-Embedded Heterocyclic Compounds to High Voltage Rechargeable Lithium Organic Batteries | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Sci. Rep. | 6. 最初と最後の頁 579 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-19037-8 | 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 Zhenxin Zhang, Satoshi Ishikawa, Masaki Kikuchi, Hirofumi Yoshikawa, Qi Lian, Heng Wang, Toshiaki Ina, Akihiro Yoshida, Masahiro Sadakane, Futoshi Matsumoto, Wataru Ueda | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 High-performance cathode based on microporous Mo-V-Bi oxide for Li battery and the investigation by operando X-ray absorption fine structure | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces | 6. 最初と最後の頁 26052-26059 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.7b07195 | 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 Heng Wang, Jin Isobe, Takeshi Shimizu, Daiju Matsumura, Toshiaki Ina, Hirofumi Yoshikawa | 4. 巻 360 |
| 2. 論文標題 Preparation of gamma-LiV2O5 from polyoxovanadate cluster Li7[V15O36(CO3)] as a high-performance cathode material and its reaction mechanism revealed by operando XAFS | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 J. Power Sources | 6. 最初と最後の頁 150-156 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpowsour.2017.06.011 | 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 |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 7件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Rechargeable Batteries Using Redox-Active MOFs as Cathode Active Materials |
| 3. 学会等名 7th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC7) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Cathode performances of porous organic crystals formed by charge-transfer interactions |
| 3. 学会等名 The 3rd Organic Battery Days (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 吉川 浩史 |
| 2. 発表標題 分子および分子集積体の蓄電機能開拓 |
| 3. 学会等名 日本化学会第100春季年会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Electrochemical Performances of Polyoxometalate-based Nanomaterials |
| 3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Rechargeable Batteries of MOFs Including Disulfide Ligand |
| 3. 学会等名 The 2nd Organic Battery Days (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Battery Performances of Molecule-Integrated Systems |
| 3. 学会等名 2018 Nankai International Symposium on Advanced Materials (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉川浩史 |
| 2. 発表標題 分子および分子集積体の蓄電機能開拓 |
| 3. 学会等名 統合物質化学研究推進機構 第4回国内シンポジウム「物質創製化学の多様化と深化」(招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉川浩史 |
| 2. 発表標題 金属錯体マテリアルが示す蓄電機能 |
| 3. 学会等名 錯体化学若手の会 第 58 回近畿支部勉強会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa, Heng Wang, Takeshi Shimizu |
| 2. 発表標題 Rechargeable Batteries Using Polyoxovanadate Related Compounds as Cathode Active Materials |
| 3. 学会等名 6th Asian Conference on Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hirofumi Yoshikawa |
| 2. 発表標題 Rechargeable Batteries Using Coordination Compounds |
| 3. 学会等名 The 100th Canadian Chemistry Conference, Toronto, Canada (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉川浩史, 清水剛志, 王恒 |
| 2. 発表標題 ポリオキソバナデートクラスター関連材料の電池特性と反応解明 |
| 3. 学会等名 第11回分子科学討論会2017仙台 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉川浩史, 清水剛志, 荒井みゆ, 栗原正人 |
| 2. 発表標題 グラフィティックカーボンナイトライドの電気化学デバイス特性 |
| 3. 学会等名 日本化学会 第98春季年会 (2018) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水 剛志, 王 恒, 松村 大樹, 吉川 浩史 |
| 2. 発表標題 架橋ジスルフィド配位子を有するCoおよびMn金属有機構造体の二次電池正極特性 |
| 3. 学会等名 日本化学会 第98春季年会 (2018) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 吉川浩史、清水剛志ら他96名 | 4. 発行年 2017年 |
| 2. 出版社 技術情報協会 | 5. 総ページ数 602 |
| 3. 書名 次世代電池用電極材料の 高エネルギー密度、高出力化 | |

〔出願〕 計1件

| | | |
|---|------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 スルフィドポリマー化合物、正極活物質、正極、及び非水系二次電池 | 発明者 宮内由紀夫、谷藤尚貴、吉川浩史 | 権利者 四国化成 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-21728 | 出願年 2017年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

| |
|--|
| 吉川研究室 http://www.kg-nanotech.jp/yoshikawa/ |
|--|

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 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 |
|---------|---------|
|---------|---------|