

令和元年6月15日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03873

研究課題名（和文）導電性ナノシートを用いた革新的レドックスキャパシタ電極の創製

研究課題名（英文）Development of high-performance redox capacitor electrode consisting of MXene nanosheets

研究代表者

大久保 将史（Okubo, Masashi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：20453673

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、MXeneと総称される層状化合物を、酸化還元を示すレドックスキャパシタ電極として応用する研究開発である。様々な電解液と組み合わせたキャパシタの性能評価を主眼に据えた研究計画であり、平成27年度から29年度において、 Ti_2CT_x （ T_x は末端基：-F, -Cl, -OH, -O）の組成を持つMXeneを Li^+ キャパシタ、 Na^+ キャパシタに応用した。その結果、200 mAh/g程度の充放電容量を示すこと、作成したキャパシタが高出力・高エネルギー密度を両立することを確認し、当初の目的をほぼ達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

省エネルギー・低炭素社会を実現する上で、高性能蓄電デバイスの開発は必要不可欠です。本研究開発は、高速で充電と放電が可能な蓄電デバイスであるキャパシタに着目し、キャパシタ内で蓄電する電極材料の高性能化に取り組みました。その結果、層状のナノシート化合物（総称：マキシン）が、非常に優れた電極特性を示し、また、マキシンを用いて作成したキャパシタが高速で駆動可能であることを実証しました。本研究の成果は、新しい物質群をキャパシタ材料として初めて定量的に評価し、その特性を明らかにした点に意義があります。

研究成果の概要（英文）：This project aims to develop high-performance redox capacitor electrodes consisting of MXene nanosheets. From 2015 to 2017, we have evaluated the electrochemical properties of MXene electrodes with various aqueous/nonaqueous electrolytes. Notably, we discovered that Ti_2CT_x MXene gives a large capacitance/capacity in nonaqueous Li^+ and Na^+ electrolytes, leading to realizing Li -ion/ Na -ion hybrid capacitors with high energy density. The balanced high energy and high power densities of MXene capacitors successfully achieved the target performance of this project.

研究分野：材料化学、電気化学

キーワード：蓄電デバイス リチウムイオン電池 ナトリウムイオン電池 キャパシタ 層状化合物 ナノシート

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー・低炭素化が重要な社会的要請となっており、その実現には再生可能エネルギーを電力系統へ連系化するための高効率蓄電デバイスが必要である。現行のリチウムイオン二次電池はリチウムイオンのインターカレーション電極反応を利用しており、(i)リチウムイオンの遅い移動による出力密度への制約、(ii)電極活物質内のリチウムイオン貯蔵可能なサイト数が少ないことによるエネルギー密度への制約、(iii)イオンインターカレーションに伴う構造変化に起因するサイクル劣化、が明瞭に性能の限界を規定しており、研究開発の進展とともにその限界に近づきつつある。従って、現行技術の性能限界を打破する蓄電デバイスを開発するためには、インターカレーション電極反応から脱却し、全く新しい電荷貯蔵メカニズムの学術的基盤を確立した上で、蓄電デバイスへ応用することが求められる。

本研究開発では、現行のインターカレーション電極反応を大きく上回る性能を示す可能性のある革新的な電荷貯蔵メカニズムとして、レドックスキャパシタ反応に着目する。レドックスキャパシタ反応は、電極 - 電解液界面におけるイオン吸着現象である点において電気化学二重層容量に類似しているが、電極活物質の酸化還元を伴う点で大きく異なる。その特徴は、(i)固体マトリックス内の遅いイオン移動を伴わないことに起因する大幅な電極反応の高速化、(ii)電極活物質内の結晶学的イオン貯蔵サイト数に制約されない高密度電荷貯蔵、(iii)界面反応であるために充放電に伴う構造変化が小さいことに起因するサイクル特性の大幅な改善、が挙げることができ、インターカレーション電極反応の全ての欠点を補う可能性のある魅力的な電極反応である。

これまでにレドックスキャパシタ反応は、導電性ポリマー、酸化物などのナノ構造体において精力的に研究が行われ、高速での電極反応が得られることが明らかになっている。しかし、特異的にイオンが強く吸着して不動化することで電荷貯蔵量や効率が低下し、また、界面における電荷貯蔵量が十分でないために高密度電荷貯蔵が実現されない、という多くの課題も明らかになっており、現状、レドックスキャパシタ反応の利点を生かす材料群は見つかっていない。

2. 研究の目的

本研究開発では、レドックスキャパシタ電極活物質として導電性ナノシート MXene に着目する。MXene と総称される導電性ナノシートは、組成式 $M_{n+1}AX_n$ で表される層状化合物 (MAX 相) から A 層を化学的処理により脱離し、導電性ナノシート (組成: $M_{n+1}X_n$) を剥離することにより得られる。この MXene は、広い表面積、高い電子伝導性、レドックス活性を有することから、レドックスキャパシタの電極活物質として応用することが可能である。

応募者のこれまでの研究から、 Ti_2C の組成を有する MXene は Na^+ 有機電解液中で高性能なレドックスキャパシタ電極活物質として機能することが明らかになっている。即ち、0.1-2.5 V vs. Na/Na^+ の電圧領域でインターカレーション材料に匹敵する充放電容量 (180~200 mAh/g 程度) を与え、更に、高出力負荷領域における容量維持率はインターカレーション材料を凌駕する。実際、 Ti_2C の組成を有する MXene はナトリウムイオン電池の高性能負極として応用が可能であり、プロトタイプフルセルはリチウムイオン電池が到達できない水準の出力特性を既に実証している。しかし、MXene が大容量と高出力を両立する要因は明らかになっておらず、また、MXene の特徴である幅広い組成選択性に対して電極特性がどのように依存するかも分かっていない。従って、MXene の電極特性を更に高性能化するための指針は全く確立されていない。

上述の研究背景を受け、本研究では、様々な組成の MXene について電極特性を調べ、電極特性の組成依存性を系統的に明らかにする。次に、イオンと表面官能基との相互作用を調べることでイオン吸着に最適な表面構造を明らかにし、電荷貯蔵の高密度化を実現するための表面制御技術を確認する。また、1価カチオンだけでなく2価カチオンやアニオン種も含む多様なイオンを含有する電解液中でのレドックスキャパシタ電極特性を明らかにし、高密度化の可能性を探索する。イオン吸着の電子状態・構造状態は、放射光を用いた先端的分光法や第一原理計算により解明する。更に、電極反応について電気化学的手法により反応速度解析を行い、律速段階に関する知見を得る。以上の知識体系を融合し、原子分子スケールからナノメソスケールに至るマルチスケールな材料設計を行うことで、優れた特性を示す導電性ナノシート (MXene) を合理的に設計・合成する技術を確認し、最終的には、次世代蓄電デバイスを構成しうる超高性能 MXene 電極を実現する。

3. 研究の方法

導電性ナノシート (MXene) をレドックスキャパシタ電極として高機能化するために、以下の研究項目を実施する。

母相 MAX 相 ($M_{n+1}AX_n$) から導電性ナノシート (MXene, 組成 $M_{n+1}X_n$) の合成は、米・Drexel 大のグループにより 2011 年に初めて報告され (M. Naguib, et al., Adv. Mater. (2011) 23, 4248.)。以降 3 年間で Ti_2C , Ti_3C_2 , V_2C など 10 種類程度の MXene 合成が報告されている。申請者もこれまでに Ti_2C , Ti_3C_2 の MXene 合成に成功している。本研究項目では、母相 MAX 相の組成多様性を利用して、様々な組成の MXene を合成する。MXene を構成する元素 M については Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo などを用い、元素 X については C と N を用いた系を合成する。また、 $(Ti_{1-x}V_x)_2C$ や $Ti_2(C_{1-x}N_x)$ などの固溶系の合成も行う。得られた MXene については、粉末 X

線回折 (XRD) による構造解析、IR/Raman 分光による表面官能基構造の解析、SEM/TEM によるナノメソ構造の観察、導電性の測定、を行うことにより、基礎的な構造・物性を明らかにする。

研究項目 (i) において得られた様々な組成の MXene を電極活物質として、種々の電解液中での電極特性を調べる。これまでに申請者は、Ti₂C の組成を持つ MXene について Li⁺有機電解液、Na⁺有機電解液中での電極特性を測定し、イオン種によって反応性に大きな違いがあることが分かった。従って、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺などの種々のカチオンを含む電解液に展開した場合、電極特性が大きく変化する可能性が高い。また、有機電解液を用いた場合、1 サイクル目の卑な電位において溶媒分子の分解に相当すると考えられる不可逆容量が生じる。即ち、溶媒分子が界面被膜や界面反応に一定の寄与をしており、溶媒の種類も MXene の電極反応に影響を与えることが考えられる。本項では、溶質だけではなく、様々な溶媒との組み合わせについても系統的に評価する。

基礎的な電極特性を調べると同時に、反応ダイナミクスについても電気化学測定を行う。例えば、電気化学インピーダンス法を適用することで界面電荷移動抵抗を測定し、また、界面電荷移動抵抗の温度依存性により界面エネルギー障壁を評価する。特に、様々な組成の MXene と様々な電解液との組み合わせでの系統的な測定を行うことで、電極活物質 電解液界面の本質的な反応速度に関する知見を集約する。

研究項目 (ii) において得られた MXene の電極反応について、構造状態・電子状態を解析することで原子分子スケールでの反応機構を解明する。

構造状態については、まず、IR/Raman/XPS などの分光手法を *ex situ* で行うことで MXene の表面官能基と反応イオンとの相互作用を調べ、イオン吸着状態を明らかにする。次に、放射光 XRD を用いて電極反応に伴うバルク構造の変化を調べると共に、EXAFS により局所構造の変化も明らかにする。電子状態については、放射光における軟 X 線吸収分光、および、硬 X 線吸収分光により MXene を構成する元素について K, L, M 吸収端の測定を行い、電極反応に伴う電子状態の変化を測定する。得られた分光データについては、第一原理計算、電荷移動多重項を考慮したクラスター計算により詳細な解析を行い、電子状態変化を明らかにする。これまでに申請者は、放射光 (軟 X 線・硬 X 線吸収) を用いた電極反応機構の解析を多数の研究成果として発表しており (例えば、Phys. Chem. Chem. Phys. (2014) 16, 7031. J. Mater. Chem. A (2013) 1, 13055. J. Phys. Chem. C (2012) 116, 24896.) 本研究項目を円滑に実施することが可能である。研究項目 H27-(ii) と H27-(iii) で得られた知見を統合することで、例えば、MXene の電極反応における酸化還元種と反応電位の相関、表面官能基と吸着イオン種が及ぼす反応速度への影響、酸化還元種と構造変化とサイクル特性の関係、などの MXene の電極特性に関する基礎的な知識体系を系統的に構築する。

前年度において構築した MXene の電極特性に関する原子分子スケールの知識体系を基に、高性能な電極特性を示す MXene の設計・合成を行う。例えば、反応電圧の制御を目指し、ヘテロ元素を固溶した MXene の合成を行う。また、界面反応速度の超高速化を目指し、表面官能基を化学的処理や熱処理により置換した MXene の合成を行う。更に、超高密度電荷貯蔵を目指し、例えば多価カチオンを特異的に高密度に吸着できるような組成・表面状態を有する MXene の設計・合成を行う。得られた MXene は、研究項目 H27-(i) と同様に XRD 測定や SEM/TEM 観察により基礎的な構造・物性を明らかにし、設計通りの材料合成に成功しているか確認する。設計通りに合成できていない場合、研究項目 H27-(i) において確立した MXene の合成技術を柔軟に適用し、材料合成を行う。

高性能化設計に従って合成した MXene について、研究項目 H27-(ii) と同様に種々の電解液中での電極特性を調べる。電極特性の測定にあたっては、充放電容量、反応電圧といった基礎的な電極活性だけでなく、実際の蓄電デバイスに応用することを見通し、初期不可逆容量、クーロン効率、分極といった特性も詳細に調べ、実用に耐えうる材料であるか判断する。

4. 研究成果

層状化合物 MXene は、組成式 $M_{n+1}AX_n$ を有する層状化合物 (MAX 相, A: Al, Si, S, etc.) から A 層を化学的処理 (フッ化水素酸、あるいはフッ化リチウム - 塩酸混合溶液) により脱離することで得られる。A 層が脱離して残った $M_{n+1}X_n$ 層を T_x で表される表面官能基 (-F, -Cl, -OH, -O など) が修飾し、MXene $M_{n+1}X_nT_x$ へ転換される。例えば、Ti₂AlC をフッ化リチウム - 塩酸混合溶液で 40 °C、15 時間処理すると、Ti₂C(OH)_{0.3}O_{0.7}F_{0.6}Cl_{0.4} が得られる。

MXene の電極応用を検討する際に重要な点として、特徴的な粒子形態を挙げることができる。微視的には $M_{n+1}X_nT_x$ ナノシートが積層した層状構造が明瞭に観測され、イオン挿入脱離反応のホスト構造として MXene が機能することが予想される。しかし、巨視的な形態観察を行うと、ナノシートが剥離した箇所が多数確認され、電解液へ暴露した表面では電気二重層容量を示すことも予想される。すなわち、MXene を活物質とした電極は、ナノシート層間へのイオン挿入脱離反応と、ナノシート表面での電気二重層形成の、2 つの電化貯蔵機構を同時に示すと考えられる。従って、基礎的な電気化学特性を議論する上には、支配的反應を明確にする必要がある。

水系リチウムイオン電解液、および水系ナトリウムイオン電解液を用いて Ti₂C_{T_x} の組成を持つ MXene 電極のサイクリックボルタンメトリ (CV) 測定を行った結果、いずれの電解液においても、キャパシタンスは電位に依存せず、電気二重層キャパシタに典型的な CV 曲線を示すことが分かった。イオンサイズ (ファンデルワールス半径) が大きく MXene 層間には挿入されないと

考えられるテトラメチルアンモニウム塩やテトラブチルアンモニウム塩を用いて表面二重層キャパシタンスを測定したところ、40 F/g であることが分かった。すなわち、150 F/g 程度のキャパシタンスは、主に層間へのイオン挿入脱離反応から生じていることが分かった。実際、水系リチウムイオン電解液中での電極反応に伴う MXene 層間距離の変化を *ex situ* X 線回折により調べたところ、層間距離は可逆的に変化することが分かった ($12.7 \text{ \AA} \leftrightarrow 13.2 \text{ \AA}$)。この層間距離の値は、電極反応前の層間距離の値 (8.7 \AA) と比較して 4 \AA 以上大きく、リチウムイオンのイオン半径が 0.9 \AA であることを考えると、水和したイオンが挿入脱離していることが強く示唆された。

水和したイオンが層間に挿入された場合、イオンの原子軌道と MXene の軌道との混成は水圏により阻害されるため、MXene の過剰電子と層間のイオンの間で電位差 Δ を持つ電気化学二重層を形成する。従って、水系電解液中での MXene 電極反応は、速度論的にはイオン移動を伴う層間へのイオン挿入脱離反応ではあるものの、平衡論的には電気二重層を形成する典型的な電気化学二重層キャパシタ電極として考えることができる。電極電位は Δ が規定し、キャパシタンスは Δ を与える電子-イオン間距離、および電子-イオン間誘電率が決定する。入出力特性は、MXene 層間の水和イオンの拡散係数、および MXene 層内の拡散距離などが影響を与えると考えられる。

非水系リチウムイオン電解液、および非水系ナトリウムイオン電解液を用いて Ti_2CT_x の組成を持つ MXene 電極の CV 測定を行った結果、いずれの電解液についても、キャパシタンスは電位に大きく依存し、特に非水系リチウムイオン電解液を用いた場合、その傾向は顕著であった。また、測定電位内で平均したキャパシタンスは非水系リチウムイオン電解液の場合 300 F/g 程度であり、水系電解液での値 (150 F/g 程度) を大幅に超えることが分かった。

電気化学特性が水系電解液と非水系電解液で大きく異なる原因を調べるために、*ex situ* X 線回折で電極反応中の層間距離の変化を調べたところ、充放電中の層間距離 ($9.4\text{--}9.8 \text{ \AA}$) は電極反応前の層間距離 (8.7 \AA) から大きな変化を示さず、脱溶媒和したイオンが層間に挿入脱離していると考えられる。水系電解液と比較して溶媒和エネルギーの小さな非水系電解液においては、MXene-電解液界面でイオンは容易に脱溶媒和してイオン挿入反応が生じる。挿入されたイオンの原子軌道は、狭い層間で MXene の軌道と直接混成することでドナーバンドを伝導帯に形成し、 M_d バンド (Ti_2CT_x では $\text{Ti } 3d$ バンド) を還元する。実際、硬 X 線吸収分光 (XANES) で Ti の K 吸収端を測定したところ、充放電に伴う XANES スペクトルの可逆的なシフトが確認され、 $\text{Ti } 3d$ バンドの可逆的レドックス反応が示された。以上のことから、非水系電解液中で MXene 電極は、脱溶媒和イオンの挿入脱離反応によるレドックスキャパシタンス (UCLA の Bruce Dunn が 2013 年に提案した *intercalation pseudocapacitance* (インターカレーション擬似容量)) を与えることが分かった。イオンの正電荷は MXene の電子に遮蔽され電子-イオン間の電位差 Δ は小さく、電極電位は MXene のリチウム化学ポテンシャルが規定し、リチウムイオンのサイト数が MXene 層間に十分ある場合、キャパシタンスはフェルミ準位の状態密度が決定する。

MXene を電極活物質として使用した場合、非水系電解液ではレドックスキャパシタとして振る舞い、 Ti_2CT_x の組成を持つ MXene は平均して 300 F/g 程度の大きなキャパシタンスを 0-3.0 V vs. Li/Li^+ 程度の広い電位範囲で与えることが分かった。そこで、この大きなキャパシタンスを負極として利用し、活性炭を正極とするリチウムイオンキャパシタを試作し、その性能を調べた。

非水系リチウムイオン電解液中の Ti_2CT_x 電極、および活性炭電極について、定電流充放電試験を Li 金属を対極とするハーフセルで行った結果、 Ti_2CT_x は、初回充電時に電解液の分解、および SEI 形成に伴う不可逆容量を示し、初回クーロン効率は 70% 程度であった。しかし、SEI 形成後の充放電サイクルでは安定な充放電特性を示し、260 mAh/g 程度の充放電容量を平均反応電圧 1.2 V 程度で示した。

そこで、 Ti_2CT_x を負極、活性炭を正極の活物質としてリチウムイオンキャパシタを作成し、その充放電特性を調べた。その結果、低入出力条件 (0.1C) 下での正極と負極の活物質合計重量当たりの充放電容量は 16 mAh/g、平均反応電圧は 2.0 V、重量エネルギー密度は 32 Wh/kg であること、および 10C 程度の入出力条件でも十分に充放電が可能なが分かった。このエネルギー密度は、同じ電極構成で水系電解液を用いたリチウムイオンキャパシタの値を大幅に上回り、電位窓の広い非水系電解液を用いること、および非水電解液中で MXene 電極が示す大きなインターカレーション擬似容量を利用することの重要性を示している。なお、今回得られたリチウムイオンキャパシタの特性は、MXene 電極の低い初回クーロン効率を補うために過剰量の活性炭正極と組み合わせ、また、負極へのプレドープを行っておらず活性炭正極の容量を十分に利用していない結果であるため、更なる重量エネルギー密度の改善が可能である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

“MXene as a Charge Storage Host”, Masashi Okubo, Akira Sugahara, Satoshi Kajiyama, Atsuo Yamada, *Acc. Chem. Res.*, 51, 591-599 (2018).

“Enhanced Li-Ion Accessibility in MXene Titanium Carbide by Steric Chloride Termination”, Satoshi Kajiyama, Lucie Szabova, Hiroki Inuma, Akira Sugahara, Kazuma

Gotoh, Keitaro Sodeyama, Yoshitaka Tateyama, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, Adv. Energy Mater., 7 (9), 1601873 (2017).

“ Sodium-Ion Intercalation Mechanism in MXene Nanosheets ”, Satoshi Kajiyama, Lucie Szabova, Keitaro Sodeyama, Hiroki Iinuma, Ryohei Morita, Kazuma Gotoh, Yoshitaka Tateyama, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, ACS Nano, 10, 3334-3341 (2016).

“ Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-ion hybrid capacitors ”, Xianfen Wang, Satoshi Kajiyama, Hiroki Iinuma, Eiji Hosono, Shinji Oro, Isamu Moriguchi, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, Nature Comm., 6, 6544 (2015).

[学会発表](計 22 件)

“ Lithium Intercalation into MXene with Hydrate Melt Electrolyte ”, Kijae Kim, Seongjae Ko, Akira Sugahara, Yuki Yamada, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, The 19th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB 2018), P110, Kyoto (Kyoto International Conference Center), Japan, 6/19 (2018).

“ High-voltage aqueous MXene supercapacitors ”, Kijae Kim, Seongjae Ko, Akira Sugahara, Yuki Yamada, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, 第 59 回電池討論会, 2H09, 大阪府大阪市 (大阪府立国際会議場), 11/28 (2018).

“ Enhanced Li-Ion Accessibility in MXene Titanium Carbide by Steric Chloride Termination ”, Masashi Okubo, Satoshi Kajiyama, Lucie Szabova, Hiroki Iinuma, Akira Sugahara, Keitaro Sodeyama, Yoshitaka Tateyama, Atsuo Yamada, International Battery Association 2017 (IBA 2017), Nara, Japan, 3/9 (2017).

“ 層状化合物 MXene Ti₂C のリチウムイオン電池負極への応用 ”, 大久保將史, 梶山智司, 飯沼広基, 菅原哲, Lucie Szabova, 袖山慶太郎, 館山佳尚, 山田淳夫, 電気化学会第 84 回大会, 東京, 3/25 (2017).

“ Two-Dimensional MXene for Nonaqueous Hybrid Supercapacitors ”, Masashi Okubo, Satoshi Kajiyama, Hiroki Iinuma, Akira Sugahara, Lucie Szabova, Keitaro Sodeyama, Yoshitaka Tateyama, Atsuo Yamada, 21st International Conference on Solid State Ionics (SSI-21), Padova, Italy, 6/23 (2017).

“ 層状化合物 MXene Ti₃C₂T_x を用いたナトリウムイオン電池負極におけるカルボキシメチルセルロースバインダーの効果 ”, 菅原哲, 梶山智司, 飯沼広基, 大久保將史, 山田淳夫, 第 58 回電池討論会, 1E08, 福岡, 11/14 (2017).

“ Pseudocapacitive Negative Electrodes Based on Mxene Ti₂CT_x for High-Power Li-Ion Batteries ”, Satoshi Kajiyama, Hiroki Iinuma, S. Lucie, Keitaro Sodeyama, Akira Sugahara, K. Gotoh, Yoshitaka Tateyama, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, 18th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB 2016), P1-0220, Chicago, Illinois, USA, 6/20 (2016).

“ Mxene: Novel Negative Electrode Materials for Sodium-Ion Batteries ”, Masashi Okubo, Xianfen Wang, Satoshi Kajiyama, Hiroki Iinuma, E. Hosono, S. Oro, I. Moriguchi, Atsuo Yamada, 18th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB 2016), P1-0350, Chicago, Illinois, USA, 6/20 (2016).

“ 層状化合物 MXene Ti₂C を用いたリチウムイオン電池負極の特性 ”, 大久保將史, 梶山智司, 飯沼広基, 菅原哲, Lucie Szabova, 袖山慶太郎, 館山佳尚, 山田淳夫, 第 57 回電池討論会, 幕張, 11/29 (2016).

“ 導電性ナノシート MXene Ti₂C のナトリウムイオン電極反応メカニズム ”, 大久保將史, 王憲芬, 梶山智司, 飯沼広基, 細野英司, 小路慎二, 森口勇, 山田淳夫, 電気化学会第 82 回大会, PBT05, 横浜, 3/15, (2015).

“ 導電性ナノシート MXene Ti₃C₂ の電極反応メカニズムの解析 ”, 飯沼広基, 梶山智司, 大久保將史, 山田淳夫, 電気化学会第 82 回大会, PS50, 横浜, 3/15, (2015).

“ 導電性ナノシート MXene Ti₃C₂ の Li+および Na+非水電解液中における電極反応メカニズム比較 ”, 飯沼広基, 梶山智司, 森田凌平, 後藤和馬, 大久保將史, 山田淳夫, 第 17 回化学電池材料研究会ミーティング, 東京, 6/16, (2015).

“ Electrochemical Properties for MXene Ti₃C₂T_x as Negative Electrode in a Non-Aqueous Sodium-Ion Electrolyte ”, Satoshi Kajiyama, Hiroki Iinuma, Masashi Okubo and Atsuo Yamada, 20th International Conference on Solid State Ionics (SSI-20), C11.04, Keystone, USA, 6/18, (2015).

“ MXene Nanosheets for Negative Electrode Materials of Sodium-Ion Batteries ”, Masashi Okubo, Lithium Battery Discussions(LiBD-7), Arcachon, France, 6/24, (2015).

“ ナノシート化合物 MXene Ti₃C₂T_x の有機電解液中における Li 脱挿入反応機構の解析 ”, 梶山智司, 飯沼広基, 森田凌平, 後藤和馬, 大久保將史, 山田淳夫, 電気化学会秋季大会, 2C06, 埼玉, 9/12, (2015).

“ Flexible MXene Nanosheets: Negative Electrode Materials for Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries ”, Masashi Okubo, Satoshi Kajiyama, Xianfen Wang, Hiroki Iinuma, Ryohei Morita, Kazuma Gotoh, Atsuo Yamada, 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Taipei, Taiwan, 10/6, (2015).

“ 層状化合物 MXene Ti₃C₂T_x のナトリウム電池用負極材料への応用 ”, 梶山智司, Lucie Szabova, 袖山慶太郎, 飯沼広基, 森田凌平, 後藤和馬, 館山佳尚, 大久保將史, 山田淳夫, 第 56 回電池討論会, 2E13, 名古屋, 11/12, (2015).

“ Pseudocapacitance of MXene Ti₂C₂T_x nanosheets for high power sodium-ion hybrid capacitors ”, Masashi Okubo, Satoshi Kajiyama, Xianfen Wang, Hiroki Iinuma, Atsuo Yamada, Pacifichem 2015, Honolulu, USA, 12/16, (2015).

“ Reaction mechanism of electrochemical ion intercalation into MXene nanosheets ”, Hiroki Iinuma, Satoshi Kajiyama, Ryohei Morita, Kazuma Gotoh, Masashi Okubo, Atsuo Ymada, Pacifichem 2015, Honolulu, USA, 12/16, (2015).

“ 層状化合物 MXene の電極応用 ”, 大久保將史(依頼講演), 山田淳夫, 第 101 回新電池構想部会, 大阪, 10/23 (2017).

“ Development of MXene nanosheets for negative electrode materials of sodium-ion battery ”, Masashi Okubo (Invited), Atsuo Yamada, 40th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2016), Florida, USA, 1/25 (2016).

“ Sodium-ion hybrid capacitor with Alluaudite cathode and Mxene anode ”, Atsuo Yamada, Masashi Okubo (Invited), IUPAC-2015, Busan, Korea, 8/11 (2015).

6 . 研究組織

(1)研究分担者
無し。

(2)研究協力者
無し。

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、研究者個人に帰属されます。