

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03877

研究課題名(和文)液体論の観点から再考するナノポーラス電極の電気化学

研究課題名(英文)Electrochemistry on nanoporous electrodes: Revisit from the viewpoint of liquid-state theory

研究代表者

深見 一弘 (Fukami, Kazuhiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60452322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではナノポーラス電極の細孔内における電気化学反応を促進するための新たな方法論の開拓を目指した。特に細孔内でのイオンの高速移動について詳細に検討した。ナノポーラスシリコンへのPt電析では、細孔径を小さくするにしたがい、電荷密度の低い(サイズの大きい)イオンが細孔内で濃化することを明らかにした。また、濃化時にはイオンの供給が極めて迅速に進むことが明らかとなった。この高速イオンの移動はナノポーラスシリコンへのPt電析に限らず、他の金属電析や電荷移動反応に寄与しない支持電解質においてもみられることが明らかとなった。本研究で得られた知見はナノポアでの電気化学反応系の設計において極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：The present study focuses on the enhancement of electrochemical reactions in nanoporous electrodes. We have studied especially from the viewpoint of mass-transport of ions in nanopores. Nanoporous silicon electrodes were utilized as the prototype porous electrode, and metal electrodeposition was conducted using the porous electrode. In platinum electrodeposition, we have revealed that the penetration of platinum complex anions were accelerated when using micropore, together with the accumulation of the ions in the confined nanopore. Such accelerated penetration was observed not only in platinum electrodeposition but also in other deposition systems and in electrolyte without metal ions. Thus, it was concluded that the accumulation and acceleration of ions in nanopore was generally achievable by choosing the appropriate pore size and charge density of ions. This conclusion is highly important for further precise control of electrochemical reactions in nanoporous electrodes.

研究分野：物理化学

キーワード：ポーラス電極 電気化学 イオン移動

1. 研究開始当初の背景

ポーラス電極を用いた電気化学は近年のデバイス開発において必要不可欠である。ポアをより小さい径でより密に作製すれば、多孔度が増し比表面積の向上が期待できる。その一方で、ポア径が小さくなるに従ってイオン伝導が著しく阻害され、期待していた反応量が得られないという事例も少なくない。比表面積を大きくすると同時に、その表面全てを効率的に利用したいにも関わらず、多くの場合それが出来ていない。高い比表面積を十分に活かした電気化学反応を達成できれば、蓄電池、キャパシタ、色素増感太陽電池などの更なる性能向上が期待できる。これを可能にするためには、古典的電気化学に立脚しながらも、ポーラス電気化学特有の効果を的確に把握し、新たな知見に基づくポーラス電極の電気化学に関する学理を開拓しなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、ナノポーラス電極に関わる課題、特にナノポアにおける物質移動とそれに伴う電気化学反応について溶媒の観点から検討した。これによりポーラス電極の電気化学において、ナノポアで効果的に反応を進行させる方法論の開拓を目指した。

3. 研究の方法

ナノポーラス電極には、シリコンの陽極酸化で作製可能なポーラスシリコンを主に用いた。陽極酸化の条件や用いる電解液組成を変化させることによって、作製するナノポーラスシリコンの平均孔径を制御した。このナノポーラスシリコンを用いて、Pt や Zn の電気化学析出について詳細に検討した。また、金属析出の知見をもとに、テトラアルキルアンモニウムカチオンのナノポアへの浸透挙動についても詳細に調べた。

4. 研究成果

ポーラスシリコンをナノポーラス電極のモデルケースとして、ナノポアでの Pt の電気化学析出における Pt 錯イオンの移動現象について検討した。Figure 1 に示すように、ナノポーラス電極を用いると電位の経時変化が停滞するプラトー域が観測される。詳細な検討の結果、この電位プラトーは Pt 錯イオンの細孔内への浸透時期と一致し、その停滞時間の長さが浸透速度に反比例することが示唆された。そこで、細孔径の異なるナノポーラスシリコンを用いて電位プラトーの長さを比較した。孔径が 30 nm から 15 nm へと低下するとプラトーの時間が増加した。これはナノポアによる拡散の阻害と考えられた。一方、4 nm のポアを用いると浸透速度が急激に増加することが分かった。その他の実験結果と合わせて考察し、細孔内における相転移的挙動が高速のイオン移動を司っていることを明らかにした。

次に、高速イオン移動が他の金属電析系においても生じうるかを確認するため、金属 Zn 電析を例に検討した。Zn²⁺をマロン酸などの

多価カルボン酸と錯形成させ、その電荷を制御することによって溶媒と構造を制御した (Figure 2)。価数ゼロの Zn マロン酸錯体を用いてナノポーラスシリコンへ電析を行うと、細孔内が高密度の金属 Zn ナノ粒子で充填された。一方で、電荷を持つ錯体を原料とした電析では、細孔内に多数のボイドが残され、電析によるナノポアの充填はうまく進行しなかった。この結果は、Pt 電析のときと同様のメカニズムで理解可能であることが分かった。

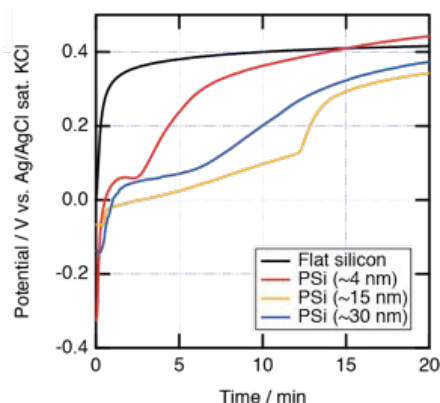


Figure 1. ナノポーラス電極への Pt 析出時に測定される電位の経時変化。平滑 Si 電極では測定されない電位の停滞期がナノポーラスシリコン電極で共通してみられる。この停滞時間がイオンの浸透速度を表しており、4 nm のポーラスシリコンが最も高速にイオン浸透することが分かる。

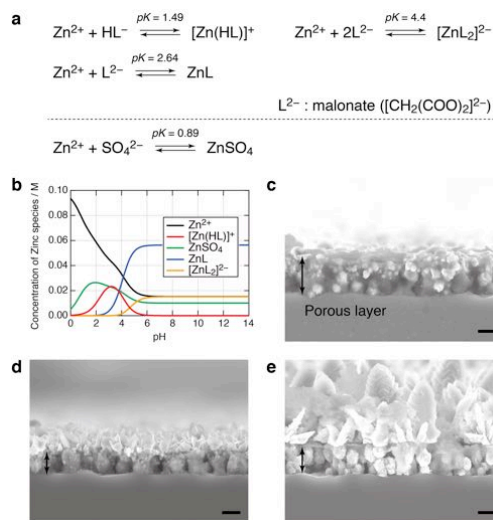


Figure 2. マロン酸と Zn²⁺の錯形成によるナノポーラスシリコンへの電析挙動変化。(a)想定される錯形成反応、(b)想定される錯形成曲線を示す。(c)(d)(e)の断面 SEM 画像は pH=3, pH=4, pH=5 の電解液で電析した試料の画像を示している。(e)のポーラス層が最も密に充填されている。

ナノポアで高効率 (高い数密度) に金属 Zn を析出させるメカニズムを明らかにするた

め、SPring-8 でのエクス線吸収微細構造 (XAFS) スペクトルの測定を行った。先の検討 (Figure 2 の検討) で、pH=5 において Zn-マロン酸錯体から高効率に金属 Zn がナノポアで析出することを明らかにしている。

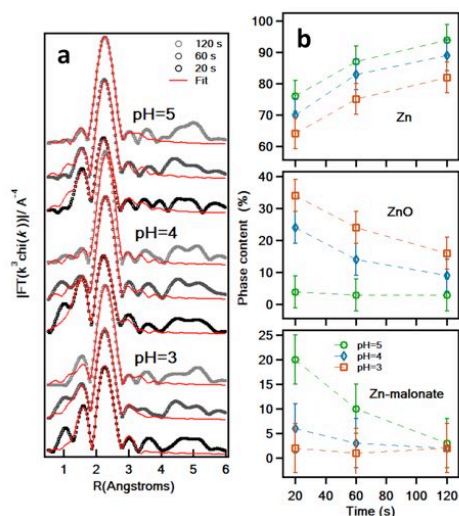


Figure 3. (a) 各 pH で調整した Zn-マロン酸錯体から金属 Zn を電析させたポーラスシリコンの XAFS スペクトル測定結果。(b) スペクトル解析から得られた各種化学物質の存在割合の経時変化。

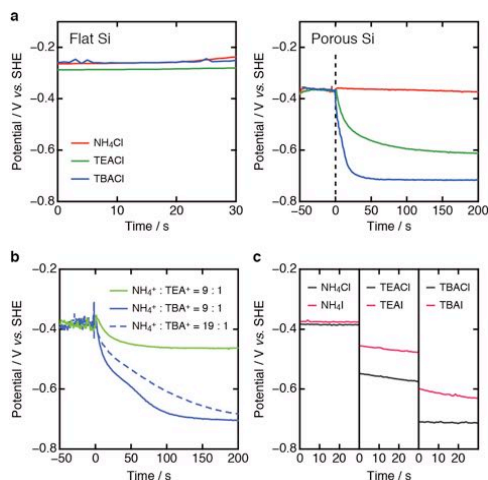


Figure 4. アルキルアンモニウムカチオンを含む電解液にシリコンならびにポーラスシリコンを浸漬した際に測定される電位の経時変化。(a)は平滑シリコンとポーラスシリコンを用いた際の比較、(b)と(c)は各種イオンが共存した際の電位の経時変化を示す。TBA⁺といった疎水性の高いカチオンは電位を負にシフトさせ、 Γ のような疎水性アニオンは電位を正にシフトさせる効果がある。

XAFS スペクトルからも、pH=5 のときは他の pH の電解液と比較して、電析開始当初から終了時まで、継続的に金属 Zn の割合が高いことが分かった。これは、Figure 2 の結果とも一致している。一方、ナノポアにおける Zn-マロン酸錯体 (価数ゼロ) の存在割合は pH=5 の場合に顕著に高く、電析開始から終了まで

概ね高い割合で推移することが分かった。この結果は、電荷を持たない Zn-マロン酸錯体が疎水性溶質として振る舞い、疎水性ナノポアであるポーラスシリコンに濃化されたことを反映している。この結果から、疎水性のナノポーラスシリコンと疎水性の Zn-マロン酸錯体の間で強い疎水性相互作用が発現し、濃化されることが電析による充填の高効率化をもたらしたものと結論付けられた。

ここまでの検討により、Pt や Zn などの金属電析において、溶媒和構造が強く影響することがあきらかとなった。次に金属イオンではなく、電荷移動反応に寄与しないアルキルアンモニウムカチオンの浸透挙動について検討した。Figure 4 に示すように種々のアルキルアンモニウムカチオンを含有する水溶液を用いて、シリコンあるいはポーラスシリコンの浸漬電位を測定した。平滑シリコンでは電位の経時変化は安定した一定値を示した。一方、ポーラスシリコンを用いた場合、テトラエチルアンモニウムあるいはテトラブチルアンモニウムのカチオンがナノポアへ浸透を開始した直後から電位が負の値へと大幅に変動した。この電位変動は、ポーラスシリコンのナノポア (疎水性) へのアルキルアンモニウムカチオン (疎水性) の濃化にともなう pH の局所変化を反映したものと考えられた。また、この局所 pH 変化がナノポアへのアルキルアンモニウムカチオンの濃化によることから、その浸透速度が電位変化の傾きによって評価可能であることが分かった。浸透速度の評価の結果、ポアサイズが小さいほど、またイオンサイズが大きいほどより高速にイオン浸透がおこることが明らかとなった。この結果は、拡散から予想される挙動と真逆の結果であり、10 nm を下回るようなナノポアにおいて高速イオン移動を達成するための、新たな設計指針になるものと期待される。

ポーラスシリコンは孔壁表面が Si-H 終端されており、時間とともにその表面が酸化されて不導体化する。実用的観点からはポーラスシリコンをそのまま利用することは現実的ではない。そこで、ナノポーラスカーボンを作製することを検討した。出発物質として 3C-SiC に注目し、それを陽極酸化によりポーラス化したのちにカーボンへと改質することを考えた。SiC は機械的強度や科学的安定性が高く、一般的には加工が難しい。電気化学的にもほとんど不活性であり、陽極酸化が困難であると考えられてきた。3C-SiC に高エネルギーの Si イオン (5.3 MeV) を照射して SiC の格子へ点欠陥を生成させ、その電気化学挙動を測定した。その結果、イオン照射なしの場合とくらべて、電気化学的な活性が飛躍的に向上することが明らかとなった。今回の研究期間では陽極酸化によるポーラス化まで検討を終えることはできなかったが、それを示唆する結果が得られており、陽極酸化ポーラス SiC を出発材料としたポーラスカー

ボン電極の作製が可能になると期待される。

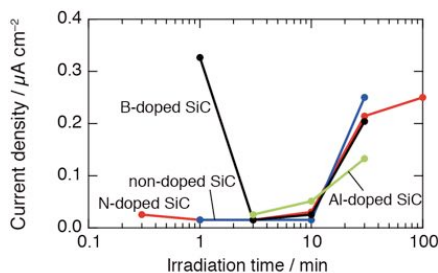


Figure 5. 高エネルギーイオン照射による3C-SiCの腐食電位変化。イオン照射による格子欠陥が増加すると腐食速度の増加が見られることから、電気化学的活性が向上していることがわかる。

このように、本研究では陽極酸化により得られるポーラス電極のより高精度な利用を目指し、ナノポアにおけるイオンの高速移動や濃化が可能であることを見出し、そのメカニズムを明らかにした。また、より化学的に安定なナノポーラス電極の作製のためにSiCの陽極酸化を可能にするなど、今後の陽極酸化ポーラス材料開発において重要な多数の知見を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Masahiro Kinoshita, Penetration of platinum complex anions into porous silicon: Anomalous effect of pore diameter caused by surface-induced phase transition. *J. Phys. Chem. C* 119, 19105-19116 (2015).
- ② Tomoko Urata, Kazuhiro Fukami, Naoto Takeda, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, Influence of solvents in HF solutions on anodic formation of mesoporous silicon, revealed by the characterization of mesoporous silicon rugate filters. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5, P250-P255 (2016).
- ③ Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Ryo Koda, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Effect of Displacement Deposition on Platinum Deposition within Nanoporous Silicon. *ECS Transactions* 69, 29-35 (2015).
- ④ Kazuhiro Fukami, Ryo Koda, Akira Koyama, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Electrodeposition in Microporous Silicon from the Viewpoint of Hydration Property: Effect of Coexisting ions in Zinc Electrodeposition. *ECS Transactions* 69, 15-21 (2015).
- ⑤ Ken-ichi Amano, Kazuya Kobayashi, Keisuke Miyazawa, Kota Hashimoto, Yunfeng Liang, Kazuhiro Fukami, Naoya Nishi, Tetsuo Sakka, Hiroshi Onishi, Takeshi Fukuma, Number density distribution of solvent on a substrate: A transform theory for atomic force microscopy. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 15534-15544 (2016).
- ⑥ Álvaro Muñoz-Noval, Kazuhiro Fukami, Akira Koyama, Dario Gallach, Daniel Hermida-Merino, Giuseppe Portale, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Takeshi Abe, Shinjiro Hayakawa, Tetsuo Sakka, Accelerated growth from amorphous clusters to metallic nanoparticles observed in electrochemical deposition of platinum within nanopores of porous silicon. *Electrochem. Commun.* 71, 9-12 (2016).
- ⑦ Ken-ichi Amano, Mitsuhiro Iwaki, Kota Hashimoto, Kazuhiro Fukami, Naoya Nishi, Ohgi Takahashi, Tetsuo Sakka, Number density distribution of small particles around a large particle: Structural analysis of colloidal solution. *Langmuir* 32, 11063-11070 (2016).
- ⑧ Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Yuya Suzuki, Atsushi Kitada, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Masahiro Kinoshita, High-rate charging of zinc anodes achieved by tuning hydration properties of zinc complexes in water confined within nanopores. *J. Phys. Chem. C* 120, 24112-24120 (2016).
- ⑨ 深見一弘, 木下正弘, 表面誘起相転移を利用したナノポアでの金属イオンの濃縮と高速移動: 金属析出から得られる知見. *Electrochemistry* 84, 726-731 (2016).
- ⑩ Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Yujin Imaoka, Atsushi Kitada, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Masahiro Kinoshita, Dynamic manipulation of local pH within a nanopore triggered by surface-induced phase transition. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 19, 16323-16328 (2017).
- ⑪ Álvaro Muñoz-Noval, Kazuhiro Fukami, Akira Koyama, Takuya Kuruma, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Takeshi Abe, Tetsuo Sakka, Shinjiro Hayakawa, Mechanism of accelerated zinc electrodeposition in confined nanopores, revealed by X-ray absorption fine structure spectroscopy. *J. Phys. Chem. C* 121, 18047-18056 (2017).
- ⑫ Ken-ichi Amano, Taira Ishihara, Kota Hashimoto, Naoyuki Ishida, Kazuhiro Fukami, Naoya Nishi, Tetsuo Sakka, Stratification of colloidal particles on a surface: Study by a colloidal probe atomic force microscopy combined with a transform

theory.

J. Phys. Chem. B 122, 4592-4599 (2018).

- ⑬ Yuki Maeda, Kazuhiro Fukami, Sosuke Kondo, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Tatsuya Hinoki, Irradiation-induced point defects enhance the electrochemical activity of 3C-SiC: An origin of SiC corrosion. *Electrochem. Commun.* 91, 15-18 (2018).
- [学会発表] (計 37 件)
- ① Kazuhiro Fukami, Ryo Koda, Akira Koyama, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Electrodeposition in microporous silicon from the viewpoint of hydration property: Effect of coexisting ions in zinc electrodeposition. ECS 228th Meeting, 2015 年 10 月, Phoenix, US. 【招待講演】
- ② Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Ryo Koda, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Effect of displacement deposition on platinum deposition within nanoporous silicon. ECS 228th Meeting, 2015 年 10 月, Phoenix, US.
- ③ 今岡勇仁, 小山輝, 深見一弘, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, ナノポーラスシリコン電極へのアルキルアンモニウムカチオンの浸透速度. 第 32 回 ARS コンファレンス, 2015 年 11 月, 姫路
- ④ 鈴木湧也, 小山輝, 深見一弘, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, カルボン酸と亜鉛イオンの錯形成によるナノポーラス電極への高効率亜鉛電析. 第 32 回 ARS コンファレンス, 2015 年 11 月, 姫路
- ⑤ 八十嶋珠仁, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, 多孔質シリコンを用いた水溶液からの希土類合金電析の試み. 第 32 回 ARS コンファレンス, 2015 年 11 月, 姫路
- ⑥ Kazuhiro Fukami, Penetration of platinum complex anions into porous silicon: Anomalous behavior caused by surface-induced phase transition. Pacifichem2015, 2015 年 12 月, Honolulu, US.
- ⑦ Akira Koyama, Ryo Koda, Kazuhiro Fukami, Naoya Nishi, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Penetration of platinum complex anions into nanoporous silicon originating from surface-induced phase transition. Pacifichem 2015, 2015 年 12 月, Honolulu, US.
- ⑧ Yuya Suzuki, Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Atsushi Kitada, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Highly-efficient zinc electrodeposition within nanoporous electrode: An effect of ionic charge controlled by complexation. Pacifichem 2015, 2015 年 12 月, Honolulu, US.
- ⑨ Yujin Imaoka, Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Atsushi Kitada, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Effect of charge density of

ammonium cations on their penetration into nanoporous silicon electrodes. Pacifichem2015, 2015 年 12 月, Honolulu, US.

- ⑩ 小山輝, 今岡勇仁, 深見一弘, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, 溶存イオンサイズに依存したポーラスシリコン層内の pH 変化. 表面技術協会第 133 回講演大会, 2016 年 3 月, 早稲田.
- ⑪ 鈴木湧也, 小山輝, 深見一弘, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, ナノポーラス電極の細孔内における Zn 電析: Zn 錯体種の影響. 電気化学回第 83 回大会, 2016 年 3 月, 大阪
- ⑫ 八十嶋珠仁, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, ポーラスシリコン電極における $Tb^{3+} \cdot Co^{2+}$ 系水溶液の電気化学. 電気化学回第 83 回大会, 2016 年 3 月, 大阪
- ⑬ 深見一弘, 小山輝, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, ミクロポーラス電極の細孔内電解液の制御による金属亜鉛負極の高速充電. JACI/GSC シンポジウム, 2016 年 6 月, 神戸
- ⑭ Kazuhiro Fukami, Akira Koyama, Atsushi Kitada, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Electrolyte solutions confined in porous silicon electrodes, PRiME2016, 2016 年 10 月, Honolulu, US. 【招待講演】
- ⑮ 小山輝, 鈴木湧也, 深見一弘, 北田敦, 作花哲夫, 安部武志, 邑瀬邦明, 電極のナノポーラス化と錯体設計による亜鉛 dendrite 成長の抑制. 日本材料学会第 2 回材料 WEEK, 2016 年 10 月, 京都
- ⑯ 松崎健太, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, Reiko Oda, 白金ナノ粒子を触媒としたシリコンへのヘリカルポア形成. 日本材料学会第 2 回材料 WEEK, 2016 年 10 月, 京都
- ⑰ 松崎健太, 小山輝, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, らせん状ポーラスシリコンへのポリピロール電解重合. 第 33 回 ARS 熱海コンファレンス, 2016 年 10 月, 静岡
- ⑱ 深見一弘, ナノポーラスシリコンの細孔内での金属イオンの濃縮と pH 制御. 第 33 回 ARS 熱海コンファレンス, 2016 年 10 月, 静岡
- ⑲ Kazuhiro Fukami, High-rate charging of zinc negative electrodes in confined nanopores. 3rd Korea-Japan Joint Symposium for ARS & ESS, 2016 年 11 月, Jeju, Korea. 【招待講演】
- ⑳ Juni Yasoshima, Kazuhiro Fukami, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Cathodic polarization behavior in aqueous Tb^{3+}/Co^{2+} electrolyte solution using nanoporous electrode. 3rd Korea-Japan Joint Symposium for ARS & ESS, 2016 年 11 月, Jeju, Korea.
- ㉑ Kazuhiro Fukami, Acceleration of electrochemical reactions in nanopores. EMN nanopore meeting, 2016 年 12 月, Hong Kong. 【招待講演】

- ② Kenta Matsuzaki, Akira Koyama, Kazuhiro Fukami, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Electropolymerization of polypyrrole in helical porous silicon. EMN nanopore meeting, 2016年12月, Hong Kong.
- ③ 深見一弘, ナノポーラス電極の細孔内における金属電析の促進. 電気化学会ナノ・マイクロファブリケーション研究会, 2016年12月, 東京 【招待講演】
- ④ 八十嶋珠仁, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, ナノポーラス電極を用いたTbCo合金電析の試み. 第18回関西表面技術フォーラム, 2016年11月, 神戸
- ⑤ Kazuhiro Fukami, Acceleration of Pt deposition within nanopores of porous silicon electrodes. 9th Kyoto International Forum for Environment and Energy, 2017年3月, 京都
- ⑥ Álvaro Muñoz-Noval, 深見一弘, 小山輝, Dario Gallach, Daniel Hermida-Merino, Giuseppe Portale, 北田敦, 邑瀬邦明, 安部武志, 早川慎二郎, 作花哲夫, ポーラスシリコンへのPt析出でみられるアモルファス状クラスターからナノ粒子への成長挙動. 表面技術協会第135回講演大会, 2017年3月, 東京
- ⑦ 松崎健太, 深見一弘, 八十嶋珠仁, 小山輝, Emilie Pouget, 北田敦, Reiko Oda, 邑瀬邦明, ポーラスシリコンへの電解重合によるらせん状ポリピロールチューブの作製. 電気化学会第84回大会, 2017年3月, 東京
- ⑧ 深見一弘, ナノポーラス電極を用いた金属ナノ粒子電析:電極の高比表面積を活かす設計. 新無機膜研究会, 2017年6月, 大阪
- ⑨ 松崎健太, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, 形状制御したPt微粒子によるSiエッチング:ポアの湾曲と粒子運動の関係. 2017年電気化学秋季大会, 2017年9月, 長崎
- ⑩ 前田有輝, 深見一弘, 近藤創介, 檜木達也, 北田敦, 邑瀬邦明, 欠陥を生成させた3C-SiCの電気化学特性. 2017年電気化学秋季大会, 2017年9月, 長崎
- ⑪ 松崎健太, 深見一弘, 北田敦, 邑瀬邦明, 形状制御したPt粒子触媒によるSiへのヘリカルポア形成. 第34回ARS松島コンファレンス, 2017年10月, 宮城
- ⑫ 松崎健太, 深見一弘, Emilie Pouget, 北田敦, Reiko Oda, 邑瀬邦明, Pt粒子触媒によるSiへのヘリカルポア形成と導電性高分子の充填. 第19回関西表面技術フォーラム, 2017年11月, 神戸
- ⑬ Kazuhiro Fukami, Juni Yasoshima, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Electrolyte solutions confined in nanopore of porous silicon: A key for precise control of electrodeposition in the pore. Porous Semiconductors Science and Technology 2018, 2018年3月, Montpellier, France.
- ⑭ Kenta Matsuzaki, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Kazuhiro Fukami, Effect of the

shape of platinum catalyst on metal-assisted chemical etching of silicon: Toward understanding of helical nanopore formation. Porous Semiconductors Science and Technology 2018, 2018年3月, Montpellier, France.

- ⑮ Yuki Maeda, Kenta Matsuzaki, Daisuke Saya, Christian Bergaud, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Reiko Oda, Kazuhiro Fukami, Electrochemical filling of helical nanopores in silicon formed by platinum-assisted chemical etching. Porous Semiconductors Science and Technology 2018, 2018年3月, Montpellier, France.
- ⑯ Yuki Maeda, Kazuhiro Fukami, Sosuke Kondo, Tatsuya Hinoki, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, Corrosion behavior of 3C-SiC with irradiation-induced defects. 22nd Topical Meeting of The International Society of Electrochemistry, 2018年4月, 東京.
- ⑰ Kazuhiro Fukami, Akira Koyama, Atsushi Kitada, Tetsuo Sakka, Takeshi Abe, Kuniaki Murase, Acceleration of ion transport within nanopore caused by confinement of electrolyte solution. 22nd Topical Meeting of The International Society of Electrochemistry, 2018年4月, 東京.

〔図書〕(計0件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
ホームページ等
http://www.echem.mtl.kyoto-u.ac.jp/index_fukami.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深見 一弘 (FUKAMI Kazuhiro)
京都大学大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60452322

(2) 研究分担者

邑瀬 邦明 (MURASE Kuniaki)
京都大学大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30283633

(3) 研究分担者

天野 健一 (AMANO Ken-ichi)
京都大学大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30634191

(4) 連携研究者

木下 正弘 (KINOSHITA Masahiro)
京都大学エネルギー理工学研究所・教授
研究者番号: 90195339