

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成 22 年度 ～ 平成 24 年度

課題番号：22360321

研究課題名（和文）アニオン膜燃料電池の高性能化のための膜構造設計

研究課題名（英文）Design of membrane structure for high performance of anion conductive membrane fuel cell

研究代表者

須藤 雅夫（MASAO SUDOH）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：80154615

研究成果の概要（和文）：本研究の目的はプラズマ重合アニオン交換膜を作製し評価することである。本研究では、4-ビニルピリジンとヘキサフルオロプロピレンを用いてプラズマ重合を行い、1-ブロモプロパンで4級化することでポリオレフィン多孔質基材上にアニオン交換層を形成している。XPSとFT-IRの結果から、表面の組成が明らかとなった。基材が薄くなることで伝導度は増大した。qPM9-15で44.9 mS/cmを示した。高い伝導度により、qPM22-5の最大出力密度(32.6 mW/cm²)はqPM20-5の最大出力密度(19.2 mW/cm²)より優れた値を示した。ホットプレス処理(10 MPa、145 °C、1 min)を行ったところ、qPM18-30Hは保水率17.2%、伝導度78.7 mS/cm、OH⁻輸率0.93を示した。また発電ではOCV0.89 V、最大出力密度32.4 mW/cm²を示した。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study are to prepare and characterize the plasma polymerized anion exchange membranes. In this study, plasma-polymerization with 4-vinylpyridine and hexafluoropropylene followed by quaternization using 1-bromopropane was conducted to fabricate anion exchange layer onto polyolefin based porous substrates. The effect of polymerization time, the thickness and porous size of the substrates and hot-press treatment was estimated. From the results of XPS and FT-IR, the chemical composition and quaternization was confirmed. The thinner the substrates were, the higher the conductivity became. qPM9-15 showed the conductivity of 44.9 mS/cm. The maximum power density (MPD) of qPM22-5 (32.6 mW/cm²) was superior to that of qPM20-5 (19.2 mW/cm²) due to the high conductivity. Hot-press treatment was conducted. qPM18-30H had the water uptake (17.2 %), conductivity (78.7 mS/cm) and t^- (0.93). The OCV (0.89 V), MPD (32.4 mW/cm²) was archived by using qPM18-30H.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
平成23年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
平成24年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動現象・単位操作

キーワード：燃料電池、アニオン膜、膜構造設計

1. 研究開始当初の背景

| 固体高分子形燃料電池は、プロトン伝導膜

を使用し実用化されている。しかし、プロトンリッチな酸性雰囲気での耐久性から Pt 系貴金属が電極触媒として用いられる。触媒量低減化にむけ種々の工夫がみられるが、長期の安定性の観点から困難な状況である。そこで、アニオン膜燃料電池が注目されてきている。216 回米国電気化学会(2009 年 10 月、Vienna)では 20 件以上の発表があった。アニオン膜燃料電池は、宇宙船での電源として開発された初期にアルカリ電解質を浸み込ませた多孔性基材に代わり、新規に水酸基イオンを輸送するアニオン伝導膜を開発し、燃料電池に使用するものである。

この長所は、①Pt 系貴金属から、Ag, Ni, Fe などの安価な電極触媒の利用が可能である。②アルコールなどの直接燃料電池でのクロスオーバーが、燃料供給方向と水酸基の輸送方向が逆向きであるため、抑制できる。一方、短所は、①アニオン膜が開発途中であり、膜伝導度がプロトン伝導膜に比べ低い。これは輸送イオン種の移動度の差によるが、さらに水和条件、膜内の輸送メカニズムなど未解決である。②燃料電池としての三相界面のためのアイオノマーの開発など膜電極接合体の設計法が未解決である。

2. 研究の目的

- (1) 本研究の目的は、直接メタノール形アルカリ燃料電池(DMAFC)に用いられるアニオン交換膜を作製し評価することである。
- (2) プラズマ重合は、高架橋、均質、ピンホールフリーで、かつ化学的にも熱的にも安定な有機膜を、様々な基材上に形成できると予測される。プラズマ重合法を利用することで、メタノールクロスオーバーが小さい薄膜を作製し、DMAFC のセル性能の向上を目指した。
- (3) 4-ビニルピリジン(4-VP)の他にヘキサフルオロプロピレン(HFP)をモノマーとして導入することで、膜の耐久性の改善及び、疎水性の向上によるメタノール透過性の抑制を図った。
- (4) プラズマ重合膜のイオン交換基密度を増加させ伝導度の向上を図るために、作製した膜に対してホットプレス処理を行った。

3. 研究の方法

- (1) 本研究では、4-ビニルピリジン(4-VP)とヘキサフルオロプロピレン(HFP)を用いてプラズマ重合を行い、1-ブロモプロパンで4級化することでポリオレフィン多孔質基材上にアニオン交換層を形成している(図 3-1)。膜厚及び空隙率が異なる基材(表 3-1)を用いることにより、プラズマ重合膜の物性にどのような影響を与えるのかを評価した。膜の作製手順は以下の通りである。初めに反応器内部を減圧し酸素を充満させ、基材に対して酸素

プラズマによる前処理を行うことで基材表面に親水基を作製した。次にアルゴン雰囲気下で2種類のモノマー(4-VP + HFP)を導入し、プラズマ重合を行った。さらに重合膜にホットプレス処理を行い、最後に膜の4級化を行うことでプラズマ重合アニオン交換膜を作製した。次に作製条件を示す。

① 前処理条件

周波数 : 13.56 MHz
装置内圧力 : 67 Pa
RF Power : 10 W
O₂ガス流量 : 50 mL/min
処理時間 : 1 min
温度 : 室温

② 重合条件

周波数 : 13.56 MHz
装置内圧力 : 67 Pa
RF Power : 10 W
Ar ガス流量 : 50 mL/min
HFP ガス流量 : 0-10 mL/min
アシスト Ar ガス流量 : 10 mL/min
処理時間 : 1 min
温度 : 室温

③ ホットプレス条件

温度 : 145 °C
圧力 : 10 MPa
時間 : 2 min

④ 4 級化条件

重合膜を 1 vol.% の 1-ブロモプロパン/プロピレンカーボネート(PC)溶液に 50 °C で 48 hr 含浸させた。含浸後、過剰な 1-ブロモプロパンを PC で洗浄することにより除去した。その後、50 °C で 12 hr 真空乾燥を行った。

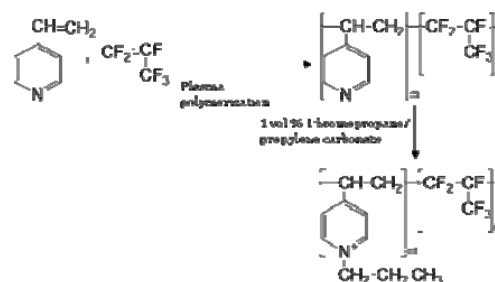


図 3-1 アニオン伝導膜の作製過程

表 3-1 基材の膜厚及び空隙率

膜名	膜厚[μm]	空隙率[%]
S20	20	40
S22	22	50
S18	18	50
S16	16	40
S12	12	40
S9	9	40

本研究では、S20 と S22 を比較し基材の空隙率の影響を評価し、S20、S16、S12、S9 を比較して基材の厚みが与える影響を評価し

た。作製した膜の名前は(q)PMXX-YYとし、XXを基材厚み(μm)、YYを重合時間(min)とする。また重合後と4級化後を区別する場合、名前の前にqを付けるものとする。加えて、膜名語尾にHが付く場合、ホットプレス処理した膜であることを示す。

(2) 膜の評価として、メタノール透過流束測定、OH⁻輸率測定、イオン伝導度測定、発電実験を行った。

4. 研究成果

(1) メタノール透過性とOH⁻輸率測定結果を図4-1に示す。プラズマ重合時間増加に伴いメタノール透過性が $2.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ から最大で $0.09 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ に低下しOH⁻輸率は0.89から0.93に増大した。これは緻密な重合物が成長したことでメタノールの透過が抑制され、イオンの選択性が向上したためであると考えられる。30 min重合した膜に対してホットプレスを行った場合、メタノール透過性の減少と輸率の向上がみられた。圧力が加わることで膜の空隙率が減少し、またイオン交換基密度が増大したことでイオン選択性が向上したことが原因と考えられる。

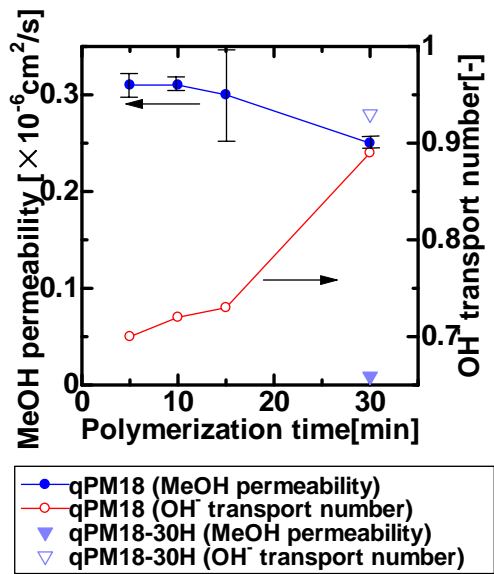


図 4-1 重合時間とメタノール透過性及びOH⁻輸率の関係

(2) 図4-2に各KOH濃度でのイオン伝導度の測定結果を示す。ホットプレス処理後の膜伝導度がおおよそ5 mS/cm向上し、1 M KOHを含有した状態で39.3 mS/cmを示した。KOHを含有しない場合の伝導度も2.2 mS/cmを示した。ホットプレス処理前は基材の多孔質構造が維持され空隙が大きい状態であったものが、多孔質構造が圧縮され、イオン交換基密度の高い部位がより接近した構造になったためであると考えられる。

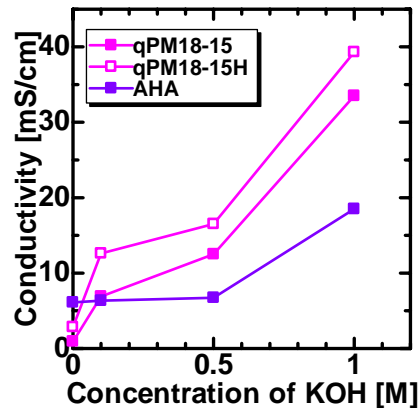


図 4-2 KOH濃度と伝導度の関係

長時間重合で重合物を成長させホットプレス処理を施すことで、メタノール透過の抑制に優れイオン伝導度の高い膜を得られた。

(3) 図4-3にqPM18-30HとAHAの発電結果の比較を示す。電極には触媒層付カーボンペーパーTGPH-90(アノード:PtRu-1.0 mg/cm²、カソード:Pt-1.0 mg/cm²)を使用した。MEA作製の際にはイオノマーは入れておらず、ホットプレスも行っていない。アノードには1.0 M MeOH + 2.0 M KOH (1 mL/min)、カソードにはO₂ (100%RH) (100 mL/min)を供給し、60 °Cの条件で発電を行った。

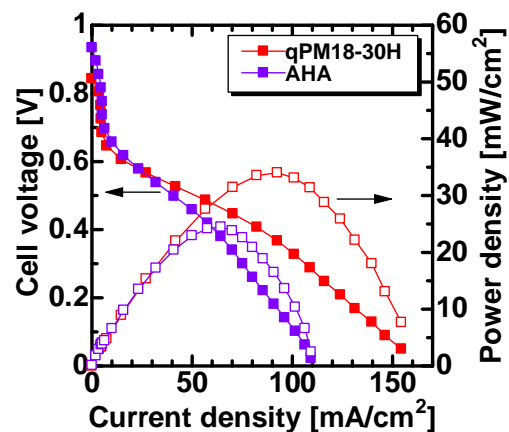


図 4-3 qPM18-30HとAHAの発電結果

qPM18-30HのOCVは0.89 VでAHAの0.93 Vと比較して小さい値であった。これは、AHAはqPM18-30Hと比較して膜が厚く、メタノールのリークが小さかったためと考えられる。最大電流密度は、AHAの110.7 mA/cm²と比べて160.1 mA/cm²と高い値を示した。本実験ではイオノマーを導入していないため、最大電流密度が伝導度に対して小さくなったと考えられる。最大出力もAHA

の 24.5 mW/cm² に対して 34.2 mW/cm² と高く、低抵抗な膜によって qPM18-30H が高い発電性能となったと考えられる。

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 12 件)

- 1) Evaluation of Pt/C catalyst degradation and H₂O₂ formation changes under simulated PEM fuel cell condition by a rotation ring-disk electrode, K. Ono, Y. Yasuda, K. Sekizawa, N. Takeuchi, T. Yoshida and M. Sudoh, *Electrochimica Acta*, 97, 58-65 (2013) 査読有
- 2) Effect of dissolution on H₂O₂ formation by using RRDE method, K. Ono, N. Takeuchi, K. Sekizawa, T. Yoshida and M. Sudoh, *ECS Transactions*, 50, (19) 33-42 (2013) 査読有
- 3) Design of rechargeable air diffusion cathode of metal air battery in alkaline solution, Y. Takashita, S. Fujimoto and M. Sudoh, *ECS Transactions*, 50,(19) 3-12 (2013) 査読有
- 4) Transport Properties of Plasma Polymerized Anion Exchange Membrane for Direct Methanol Alkaline Fuel Cells, T. Kurozumi, Y. Okajima, H. Nagai and M. Sudoh, *ECS Transactions*, 50(2), pp.2109-2118 (2012) 査読有
- 5) Performance of fuel-cell type CO sensors using each of polybenzimidazole (PBI) and Nafion membranes, K. Mochizuki, T. Kikuchi, M. Sudoh, Y. Ishiguro and T. Suzuki, *J. Electrochemical Society*, 158, pp. J71-J75 (2011) 査読有
- 6) Effect of carbon dioxide on performance of PEMFC using reformed gas containing hydrogen gas from biogas, Y. Okajima, A. Yamamoto, M. Sudoh, S. Sakai and Y. Matsumoto, *Electrochemistry*, 79, 346-348 (2011) 査読有
- 7) Design of multi-layered anode for direct methanol fuel cell, T. Nakashima, H. Saito, K. Murano and M. Sudoh, *Electrochemistry*, 79, 361-363 (2011) 査読有
- 8) Evaluation of Ag-based Gas-Diffusion electrode for Two-Compartment Cell used in Novel Chlor-Alkali Membrane Process, M. Sudoh, K. Arai, Y. Izawa, T. Suzuki, M. Uno, M. Tanaka, K. Hirao and Y. Nishiki, *Electrochimica Acta*, 56, 10575-10581 (2011) 査読有
- 9) Anion Conductive Membrane Prepared by Plasma Polymerization for Direct

Methanol Alkaline Fuel Cell, Masao Sudoh, Sachi Niimi, Tomohiro Kurozumi and Yoshiki Okajima, *ECS Transactions*, Vol.41, No.1, Polymer Electrolyte Fuel Cells 11, Membrane, 1775- 1784 (2011) 査読有

- 10) Design of direct methanol fuel cell with anion conductive membrane prepared by plasma polymerization, M. Sudoh, S. Niimi, N. Takaoka and M. Watanabe, *ECS Transaction*, 25(13), p.61-70 (2010) 査読有
- 11) Response Properties of Amperometric CO Sensor Using a Polybenzimidazole (PBI) Membrane above 140 °C, K. Mochizuki, H. Iwatsu, M. Sudoh, Y. Ishiguro and T. Suzuki, *Electrochemistry*, 78, pp.129-131 (2010) 査読有
- 12) Comparison between Nafion and Polybenzimidazole (PBI) membranes for fuel cell type CO sensor, K. Mochizuki, T. Kikuchi, M. Sudoh, Y. Ishiguro and T. Suzuki, *ECS Transactions*, Vol 28 pp.91-99 (2010) 査読有

[学会発表] (計 51 件)

- 1) 安江智広、長沢雄亮、須藤雅夫 電気二重層キャパシタの性能に与える影響因子, 化学工学会 78 年会 2013. 3. 17-19 大阪
- 2) 神谷和宏、須藤雅夫, 呼気中エタノールセンシングのための小型燃料電池の非定常応答, 化学工学会 78 年会 2013. 3. 17-19 大阪
- 3) 岡本祐樹、小野賢志郎、須藤雅夫, 固体高分子形燃料電池の過酸化水素生成, 化学工学会 78 年会 2013. 3. 17-19 大阪
- 4) 永井秀和、下川亮介、菅沢幸大、須藤雅夫, アニオン伝導層ハイブリッド膜を用いる燃料電池の性能特性, 化学工学会 78 年会, 2013. 3. 17-19 大阪
- 5) 下川亮介、永井秀和、菅沢幸大、水口 尚、須藤雅夫, 固体高分子形燃料電池の膜内水分輸送の実時間挙動解析, 化学工学会 78 年会 2013. 3. 17-19 大阪
- 6) 長沢雄亮、須藤雅夫, 電気二重層キャパシタのセル性能に与える活性炭性状の影響, 第 15 回化学工学会学生発表会 2013. 3. 2 米沢
- 7) 保田雄貴、須藤雅夫, 燃料電池の Pt/C 触媒での過酸化水素生成に対する ECSA の影響評価, 第 15 回化学工学会学生発表会 2013. 3. 2 米沢
- 8) 大村光作、須藤雅夫, プラズマ重合アニオン伝導膜の輸送特性, 第 15 回化学工学会学生発表会 2013. 3. 2 米沢
- 9) 井田徹、須藤雅夫, 亜鉛-空気電池に用いるガス拡散電極の充放電特性, 第 15 回化学工学会学生発表会 2013. 3. 2 米沢

- 10) 菅沢幸大、須藤雅夫，固体高分子形燃料電池における膜内水輸送解析，第15回化学工学会学生発表会，2013.3.2 米沢
- 11) 黒住知弘、大村光作、永井秀和、須藤雅夫，プラズマ重合アニオン伝導膜の輸送特性とDMAFC発電性能，第53回電池討論会 2012.11.24-25 福岡
- 12) 小野賢志郎、岡本祐樹、保田雄貴、竹内仙光、関澤好史、吉田利彦、須藤雅夫，白金担持炭素触媒の連続電位操作での過酸化水素生成能評価，第53回電池討論会，2012.11.24-25 福岡
- 13) K.Kikuchi, T. Yasue, R. Yamashita, S. Sakuragawa, M. Sudoh, An electric double layer capacitor using spent coffee grounds derived activated carbon electrode, BIOCOMP 2012 2012.11.27-31 静岡
- 14) 竹下雄太、井田徹、藤本晋太郎、須藤雅夫、尾形節郎、錦善則，アルカリ空気電池の銀触媒カソードの充放電特性，第36回電解技術討論会 2012.10.25-26 滋賀県立大学
- 15) T. Kurozumim Y. Okajima, H. Nagai and M. Sudoh Transport properties of plasma polymerized anion exchange membrane for direct methanol alkaline fuel cells, ECS PRiME 2012 2012.10.7-12 Hawaii, USA
- 16) Y. Takeshita, S. Fujimoto and M. Sudoh, Design of rechargeable air diffusion cathode of metal-air battery in alkaline solution, ECS PRiME 2012 2012.10.7-12 Hawaii, USA
- 17) K. Ono, N. Takeuchi, K. Sekizawa, N. Takeuchi, Yoshida and M. Sudoh, Effect of Pt dissolution on H₂O₂ formation by using RRDE method, ECS/PRiME 2012, 2012.10.7-12 Hawaii, USA
- 18) 安江智広、古藤田輝昭、須藤雅夫、電気二重層キャパシタの電極構造因子が与える性能特性のモデル予測，化学工学会第44回秋季大会 2012.9.19-21 東北大学
- 19) 神谷和宏、菊池貴之、須藤雅夫，燃料電池型アルコールセンサの応答特性，化学工学会第44回秋季大会 2012.9.19-21 東北大学
- 20) 永井秀和、下川亮介、須藤雅夫，複極性膜を用いる燃料電池の運転特性，化学工学会第44回秋季大会，2012.9.19-21 東北大学
- 21) 岡本祐樹、小野賢志郎、須藤雅夫，固体高分子形燃料電池運転時の過酸化水素生成の評価，化学工学会第44回秋季大会 2012.9.19-21 東北大学
- 22) 須藤雅夫、菊池貴之、神谷和宏、望月計、燃料電池型COセンサのMEA劣化要因解析，第22回電極材料研究会 2012.7.27 甲府
- 23) 神谷和宏、菊池貴之、須藤雅夫，燃料電池型アルコールセンサの応答特性，電気化学会第79回大会 2012.3.29-31 アクトシティ浜松
- 24) 黒住知弘、岡島良樹、永井秀和、須藤雅夫，プラズマ重合アニオン伝導膜の特性と発電性能，電気化学会第79回大会 2012.3.29-31 アクトシティ浜松
- 25) 小野賢志郎、岡本祐樹、須藤雅夫，燃料電池運転時の過酸化水素生成速度に与える影響因子，電気化学会第79回大会 2012.3.29-31 アクトシティ浜松
- 26) 安江智広、古藤田輝昭、須藤雅夫，電気二重層キャパシタの電極構造特性と性能評価，電気化学会第79回大会 2012.3.29-31 アクトシティ浜松
- 27) 竹下雄太、藤本晋太郎、須藤雅夫，アルカリ空気電池における銀触媒カソードの酸素還元能及び耐酸化性評価，電気化学会第79回大会 2012.3.29-31 アクトシティ浜松
- 28) 岡島良樹、永井秀和、藤城雅之、須藤雅夫，固体高分子形燃料電池の湿度変化と性能評価，化学工学会77年会 2012.3.15-17 工学院大学
- 29) 菊池貴之、望月 計、須藤雅夫，燃料電池作動型COセンサの廉価要因解析，化学工学会77年会 2012.3.15-17 工学院大学
- 30) 古藤田輝幸、安江智広、須藤雅夫，電気二重層キャパシタの多孔質理論によるモデリング，化学工学会77年会 2012.3.15-17 工学院大学
- 31) 藤本晋太郎、竹下雄太、須藤雅夫，アルカリ電解ガス拡散電極の金属-空気電池への応用と特性評価 化学工学会77年会 2012.3.15-17 工学院大学
- 32) 山田健二、須藤雅夫，回転リングディスク電極を用いるアルカリ水溶液での酸素還元プロセスの解析，第14回化学工学会学生発表会 2012.3.3 東京
- 33) 永井秀和、須藤雅夫，プラズマ重合法電解質膜の作成と膜特性評価，第14回化学工学会学生発表会 2012.3.3 東京
- 34) 神谷和宏、須藤雅夫，燃料電池型アルコールセンサの特性評価，第14回化学工学会学生発表会 2012.3.3 東京
- 35) 岡本祐樹、須藤雅夫，燃料電池運転時の過酸化水素生成に対する加湿の影響，第14回化学工学会学生発表会 2012.3.3 東京
- 36) 安江智広、須藤雅夫，電気二重層キャパシタに用いられる「炭素電極のカーボンブラック比率の影響」，第14回化学工学会学生発表会 2012.3.3 東京
- 37) 竹下雄太、藤本晋太郎、須藤雅夫，銀触媒電極の酸素還元能と対酸化性能 第35回電解討論会 2011.11.14-15 京都
- 38) 須藤雅夫，ガス拡散電極を用いる電気化学プロセスの設計，第35回電解討論会 2011.11.14-15 京都
- 39) 坂井研斗、遠藤聡一郎、山田健二、須藤

雅夫, 回転円盤電極によるアルカリ水溶液中での酸素還元反応の速度解析, 第42回中化連 2011.11.5.6 長野

40) M. Sudoh, S. Niimi, T. Kurozumi, Y. Okajima, Anion conductive membrane prepared by plasma polymerization for direct methanol alkaline fuel cell, 220th ECS 2011.10.11 Boston, USA

41) 小野賢志郎, 中嶋恒良, 小野達也, 須藤雅夫, 白金担持炭素電極触媒の過酸化水素生成能評価, 第52回電池討論会 2011.10.17-20 東京

41) 黒住知弘, 新美幸, 岡島良樹, 須藤雅夫, アニオン膜を用いるアルカリメタノール燃料電池の評価, 第52回電池討論会 2011.10.17-20 東京

43) 藤城 雅之, 岡島 良樹, 黒住 知弘, 須藤 雅夫, 固体高分子形燃料電池の膜伝導度の測定法比較, 化学工学会第43回秋季大会 2011.9.14-16 名工大

44) 小野 賢志郎, 中嶋 恒良, 小野 達也, 須藤 雅夫, 燃料電池電極触媒の酸素還元反応における過酸化水素生成評価, 化学工学会第43回秋季大会 2011.9.14-16 名工大

45) 竹下 雄太, 藤本 晋太郎, 須藤 雅夫, アルカリ空気電池のための銀触媒カソードの設計, 化学工学会第43回秋季大会 2011.9.14-16 名工大

46) 黒住 知弘, 新美 幸, 岡島 良樹, 須藤 雅夫, 直接メタノール形燃料電池のためのプラズマ重合アニオン膜の設計, 化学工学会第43回秋季大会 2011.9.14-16 名工大

47) S. Fujimoto, Y. Takeshita and M. Sudoh, Application of air diffusion cathode for alkali electrolysis to metal-air battery, 63rd I S E 2011.9.11-16 新潟

48) T. Kikuchi, K. Mochizuki, M. Sudoh, H. Hadano, Y. Ishiguro Fuel cell type CO sensor in wide range from 30°C to 200°C using Poly benzimidazole (PBI) membrane, 63rd I S E 2011.9.11-16 新潟

49) Y. Okajima, S. Niimi, T. Kurozumi, M. Fujimoto, M. Sudoh, Direct methanol alkaline fuel cell with anion conductive membrane prepared by plasma polymerization 63rd I S E, 2011.9.11-16 新潟

50) T. Kotoda, H. Yamano, T. Takikawa and M. Sudoh Prediction of structure factors of electric double layer capacitor by porous electrode theory 63rd I S E 2011.9.11-16 新潟

51) 藤本晋太郎 竹下雄太 須藤雅夫, 銀触媒ガス拡散カソードにおける炭素材料の影響, 第21回電極材料研究会 2011.7.29 横浜

〔図書〕(計2件)

須藤雅夫 編著「基礎 化学工学」239頁 (共立出版) (2012.12.25)

須藤雅夫 分担 8.4.3.膜素材の構造と性質 「第6版 電気化学便覧」(丸善) (2013.1.15)

〔その他〕

ホームページ等

<http://cheme.eng.shizuoka.ac.jp/sudohlab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須藤雅夫 (MASAO Sudoh)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 80154615

(2) 研究分担者

福原長寿 (CHOJI FUKUHARA)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 30199260

(3) 連携研究者

なし