

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656487

研究課題名（和文） 新規複極性膜による燃料電池のドライ運転

研究課題名（英文） Dry operation of fuel cell using novel bipolar membrane

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）：

本研究における最終的な目標は、ハイブリッド型燃料電池での自己加湿運転(HMFC)であるが、その前段階として、アニオン膜(AHA、A901)を使用して、定電流測定を行い AEMFC での水輸送解析を行った。AEMFC では、膜内を OH⁻が輸送しており、それに伴い電気浸透水がカソードからアノードへと輸送されていることが確認された。HMFC による発電性能の比較を行った。BP-1、Nafion212 & A901、Nafion212、の異なる 3 種類の電解質膜を使用して MEA を作製した。発電測定結果より、作製したハイブリッド膜は、市販バイポーラ膜である BP-1 膜よりも高い性能を示した。また、電解質膜に Nafion212 のみを使用したものよりも、A901 を使用した方が高い性能を示した。

研究成果の概要（英文）：

The final goal of this work is the operation with self-humidification of hybrid membrane fuel cell. In advance, water transport analysis was conducted by using anion membrane fuel cell(A201, A901) at constant current. It was observed that water was moved from the cathode to the anode accompanied with OH⁻ ion transport. came wet as self-humidification. Power generation tests were conducted using BP-1, N212-A901 and N212. Hybrid membrane of N212-A901 was superior among the membranes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

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、低湿度運転、水分管理、ハイブリッド膜、複極性膜

1. 研究開始当初の背景

近年、次世代のエネルギー装置として燃料電池が注目されている。燃料電池には、電解質や燃料により様々な種類の燃料電池が存在するが、その中でも、低温作動や小型化と

いった点から、電解質膜に固体高分子膜を用いる PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)が、特に注目されている。PEMFC の反応機構は、アノード側で水素の酸化反応が、カソード側で酸素還元反応が起きることに

より電気エネルギーを取り出すことができる。この時、カソード側では反応により H₂O が生成される。現在、PEMFC は、家庭用発電装置や、自動車用電池として各社で開発が進められている。しかし、PEMFC は、電解質膜に Nafion 等のフッ素系プロトン交換膜 (PEM) を使用しており、高い伝導度を維持するには供給ガスに対して適切な加湿が必要とされ、装置の大型化の原因となっている。一方、供給ガスの加湿が不足すると、膜乾燥や膜劣化(Dry-out)を引き起こす。このため、PEFC では複雑なセル内水分管理が必要であり、小型化や装置の簡易化といった点から、低加湿、無加湿状態での運転可能な PEFC が求められている。

2. 研究の目的

- (1) これらの問題の解決策として、我々は、プロトン伝導層とアニオン伝導層を積層したハイブリッド膜からなる、ハイブリッド MEA 型燃料電池(HMFC)を考案した。セル内の反応機構を図 1 に示す。この新規な Hybrid MEA を用いる燃料電池では、プロトンと水酸基アニオンが向流に輸送され、界面で水分が生成される。このため、低加湿状態でも膜の湿潤状態を保つ自己加湿効果を発揮することが期待されている。
- (2) Nafion を用いた PEMFC の水輸送に関する報告は数多く報告されているが、アニオン膜(AEM)やハイブリッド膜を用いた燃料電池に関する報告は少なく、それらの燃料電池でのセル内のイオンや水分の輸送機構に関しては未解明な部分が多い。そこで、本研究では、アニオン膜を用いる燃料電池(AEMFC)で定電流測定を行い、セル内水分解析を行った。この測定の目的は、PEMFC と AEMFC での輸送機構を明らかとすることである。また、HMFC について、3 種類の HMFC を作製し、それらの発電性能を測定し比較した。

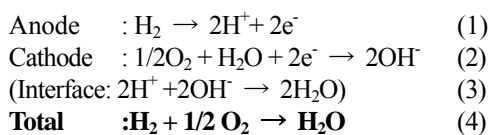
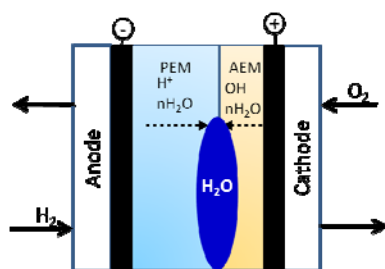


図.1 Hybrid MEA Fuel Cell の反応式及び輸送機構の概略図。

3. 研究の方法

(1) MEA の作製

① PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

電解質膜には Nafion117(173 μm)、Nafion212(52 μm)を使用し、電極には TGPH060H Pt 1 mg/cm² 担持電極を使用した。ホットプレス条件は 125 °C 1 MPa 2min とし MEA を作製した。

② AEMFC (Anion Exchange Membrane Fuel Cell)

電解質膜には、アニオン膜 AHA(217 μm)、A901(10 μm)を使用し、AEM 型電極は自作した。ガス拡散層としてカーボンペーパー TGPH-060H を使用し、アニオンイオノマー、Pt/C 触媒(Pt 45.8 wt %)、1-propanol、蒸留水を独自の割合で混合し、超音波攪拌後、カーボンペーパー上に Pt 1 mg/cm² となるよう塗布した。各 MEA はプレスして作製した。

③ HMFC (Hybrid MEA Fuel Cell)

3 種類のハイブリッド型 MEA を作製し、発電性能を比較した。市販ハイブリッド膜 BP-1(265 μm, Tokuyama)を用いた MEA(BP-1), Nafion212, A901 から成る自作ハイブリッド膜 MEA(HMEA-I)、Nafion212 とアニオンイオノマーから成る MEA(HMEA-II) をそれぞれ作製し、測定を行った。各 MEA には、アノード側に Pt 触媒付き電極 (TGPH-060H Pt 1 mg/cm²) を使用し、カソード側には自作した自作 AEM 型電極を使用し、ホットプレス法により MEA を作製した。

(2) 発電実験, セル内水分輸送測定

作製した MEA を用いて LSV 測定や定電流測定を行った。定電流測定では、セル出入口に取り付けた温湿度センサ(HC2-IC ロトリック社)を用いて供給ガスの RH を測定し、下記の式を用いて正味水輸送係数(α)を求め、セル内水分輸送の調査を行った。ここで n はガス中水分量を表す。α を用いることで、定常状態時におけるセル内での水分輸送の方向が明らかとなる。ここでは、α が正の値であればアノードからカソード方向(→)へ、負の値であればカソードからアノード方向(←)への正味の水輸送を表す。

Anode: H₂ Cathode: O₂ 電極面積: 5.29 cm² 印加電流: 100-1500 mA セル温度: 65 °C センサ温度: 75 °C 供給ガス湿度: 80 %

$$\alpha_{AEM} = \frac{n_{in, cathode} + n_{gen} - n_{out, cathode}}{iA / F}$$

$$\alpha_{PEM} = \frac{n_{in, anode} - n_{out, anode}}{iA / F}$$

4. 研究成果

- (1) 図 2-1 から図 3-2 に Nafion212 と A901 の定電流測定での RH 挙動と実時間 α 挙動の

測定結果を示す。図 2-1,2-2 より、Nafion212 は電流印加後、直ちにカソード側湿度が上昇し、アノード側湿度では緩やかな上昇が見られた。その後、RH は定常状態となった。これは、Nafion212 は電流印加後、カソード側での ORR 反応とアノードからカソードへ H⁺ 移動に付随する電気浸透水により水分量が増加したためである。また、同時間での α を算出したところ、電流印加直後は大きく正になり、その後定常状態に推移し、電流遮断時には大きく負の値を示した。電流印加直後は、電気浸透(EOD)による水輸送が支配的に行われるため α が正を示すが、電流遮断時では、EOD による影響がなくなるものの、両極間に水の濃度勾配が存在するため BD が支配的となり、 α が負に推移したことを表している。

図 3-1、3-2 に A901 を用いたセルでの RH 挙動変化と実時間 α 挙動結果を示す。Nafion212 とは大きく異なり、電流印加後、アノード側で大きな湿度上昇が見られた。これは、AEMFC では、OH⁻ がカソードからアノードに輸送されているため、その輸送に伴う EOD が PEMFC とは逆向きに輸送されているためだと考えられる。また、AEMFC での実時間 α 挙動では、電流印加直後大きく正の値を示した。これは、A901 では発電時にアノード側で水の生成、カソード側で水の消費反応が起きているため、電流印加直後から両極間の水の濃度勾配が大きくなり、BD が支配的となるため α が正に推移したと考えられる。電流遮断時では EOD による影響はなくなるが両極間での水の濃度勾配による BD により α が正の値を示しながら緩やかに収束していることが確認された。

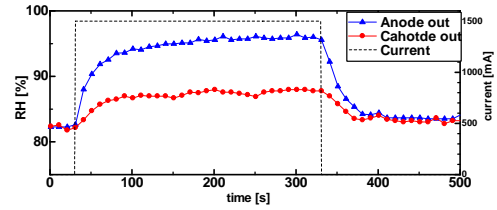


図 3-1 AEMFC(A901)の出口ガス実時間 RH 挙動

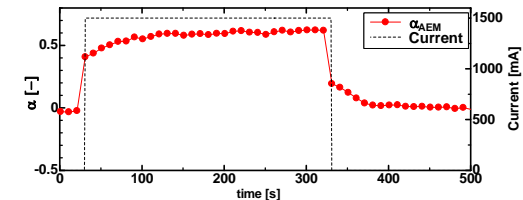


図 3-2 AEMFC(A901)の実時間 α 挙動

(2) 図4に厚さの異なる電解質膜での定電流測定の実時間 α の測定結果を示す。プロトン交換膜やアニオン交換膜同士でも膜厚により、定常状態での水の輸送方向が変化することが確認された。これは、Nafion117やAHA膜といった厚みの大きな膜では、EOD による影響が、Nafion212 や A901 といった厚みの小さい膜では BD が支配的であることを示している。これらの結果より、PEM,AEM を張り合わせた Hybrid MEA では、各イオンが向流に輸送され膜界面で水生成反応が起きると考えられる。また、膜厚の薄い PEM と AEM を使用した場合には、それぞれの膜で逆拡散が支配的となるため、膜界面で生成した水が逆拡散され、膜全体を潤す、自己加湿効果を持つことが十分期待できる。

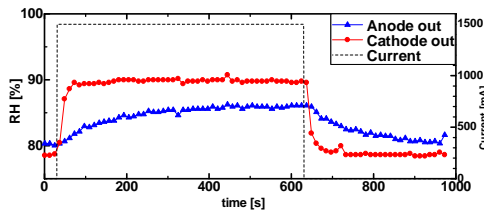


図 2-1 PEMFC(Nafion212)の出口ガス実時間 RH 挙動

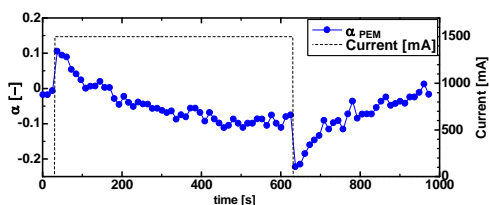


図 2-2 PEMFC(Nafion212)の実時間 α 挙動

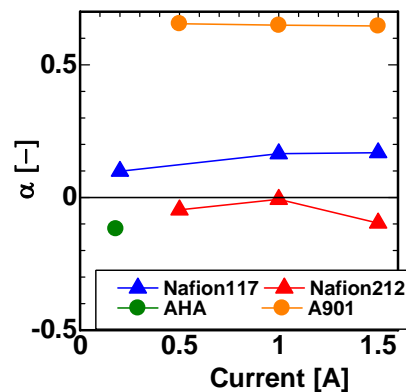


図 4 各電流値における PEMFC、AEMFC の定常状態での α

(3) 図 5 に各 MEA(BP-1、HMEA-I、HMEA-II) の発電結果の比較を示す。Nafion212 と A901 から成る HMEA-I が最も高い発電性能を示した。これは、HMEA-I は市販 BP-1 膜よりも膜

厚が薄く、膜抵抗が小さくなるため、または、膜界面で生成された水が BP-1 よりも膜全体に拡散されやすく、湿潤状態を保つことができたためだと考えられる。また、アニオン伝導層としてアニオンイオノマーのみを使用した HMEA-II よりも A901 膜とアニオンイオノマーを使用した HMEA-I が高い性能を示した。これはアニオン伝導層として電解質膜が存在することにより、イオン伝導が容易になり、また生成された水によるフラッディングを防ぐことができたためだと考えられる。このため、HMFC の MEA を作製する際にはアニオン交換膜の存在が非常に重要であることが確認された。

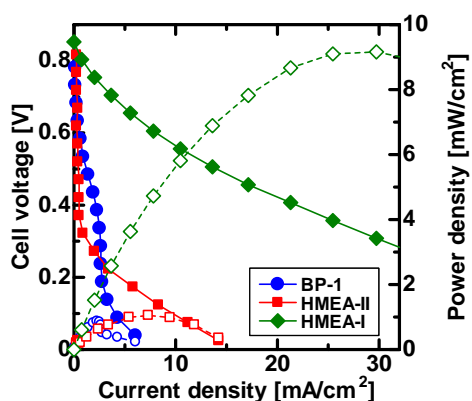


図5 BP-1、HMEA-I、HMEA-II の発電結果

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 11 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.)
- 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)
- 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)
- 4) Development of a measurement system of laser efficiency in the crystalline polymer welding process, R. Okuizumi, S.

Hirota, M. Sudoh and Y. Okano, *J. Advanced Research in Physics*, 3(1), 011212 (1-6) (2012)

5) 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)

6) 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)

7) 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)

8) Design of multi-layered anode for direct methanol fuel cell, T. Nakashima, H. Saito, K. Murano and M. Sudoh, *Electrochemistry*, 79, 361-363 (2011)

9) 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)

10) 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)

11) Process analysis of laser welding method with polybutylenephthalate (PBT), R. Okuizumi, S. Hirota, M. Sudoh and Y. Okano, *Advanced Materials Research*, 222,150-153 (2011)

[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, BIOCAMP 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応能と対酸化性能 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 300C to 200 oC 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

なし

(3) 連携研究者

なし