J. Inst. Electrostat. Jpn. 論 文

静電噴霧法を用いたDMFC用触媒層の 乾燥温度と発電性能の関係

江頭 雅之^{*,1},小林 紀輝^{*},北岡 徳大^{*},矢澤 翔大^{*},工藤 祐輔^{*},中西 哲也^{*} (2017年9月11日受付:2017年12月18日受理)

Relationship Between Power Generation Performance and Drying Temperature of Catalyst Layer for DMFC by Electrostatic Spray Masayuki EGASHIRA^{*,1}, Kazuki KOBAYASHI^{*}, Naruhiro KITAOKA^{*}, Shota YAZAWA^{*}, Yusuke KUDO^{*} and Tetsuya NAKANISHI^{*}

(Received September 11, 2017; Accepted December 18, 2017)

Progress of power generation performance of DMFC can be expected by increasing surface area of catalyst layer. In this study, catalyst layer for DMFC was fabricated by electrostatic spray. And the power generation performance of DMFC was investigated when the drying temperature was changed from 40°C to 120°C during electrostatic spray. From the results, the power generation performance of DMFC improved when the drying temperature was increased in the range 40°C to 100°C. It is thought that the surface area of catalyst layer was increased as drying temperature increased. However, the power generation performance of DMFC was not progressed when drying temperature was 120°C. It is thought that the electrolyte in catalyst layer was deteriorated by heat. From the above, it was found that the optimal drying temperature was 100°C.

1. はじめに

近年,水素エネルギーを用いた燃料電池に注目が集まっている.燃料電池の種類の一つに水素ではなくメタノールを用いて発電を行う直接メタノール形燃料電池 (Direct methanol fuel cell: DMFC)がある.DMFC は発 電を行う際,水素貯蔵技術や改質器を用いないためポー タブル用電源としての活躍が期待されている¹⁾.

DMFC の構造を図1に示す. 左から DMFC の各部材 を固定するためのエンドプレート,メタノール燃料や酸 素の流路となるセパレーター,パッキンとしての役割を もつガスケット,メタノールや酸素を触媒層全体に拡散 するためのガス拡散層,供給されたメタノールを酸化さ せ水素イオンを生成する燃料電池のアノードとなる燃料 極側の触媒層,生成された水素イオンのみを対向電極へ と供給するイオン交換膜,対向電極であり水素イオンと 酸素を還元し水を生成する燃料電池のカソードとなる空 気極側の触媒層から構成されている.

DMFC の発電性能は触媒層の表面積を増加させると向 上すると言われている². 触媒層の表面積を増加させる方

キーワード:静電噴霧法, 燃料電池, DMFC, 触媒薄膜, 乾燥温度

*日本大学大学院生産工学研究科電気電子工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Industrial Techology, Nihon University, 1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575, Japan masayuki@mem.iee.or.jp 法の一つとして静電噴霧法により触媒層を作製する研究 がなされている³⁻¹⁰.静電噴霧法とは溶液に高電圧を印加 することで溶液を微粒子状にし塗布する方法である^{11,12)}. 静電噴霧法を用いて触媒層を作製した場合,溶液が微粒 子状に堆積し触媒層を形成することが従来の研究で明ら かとなっている⁹⁾.触媒層が微粒子状に形成されるため 表面積の増加が可能と考えられる.静電噴霧法を用いて 触媒層を作製した例として,高分子膜である Nafion 膜 に塗布した例³⁾とカーボンペーパーやカーボンクロスと いったガス拡散層基材に塗布した例⁴⁻¹⁰⁾がある.静電噴 霧法は噴霧を行いながら塗布対象となる堆積基板を熱し て溶液を常時乾燥させる.しかし,触媒層作製時の乾燥 温度を変化させた時の DMFC の発電性能がどのように 変化していくかについて詳しく調べられていない.

本研究ではガス拡散層基材であるカーボンペーパーに対 して静電噴霧法を用いて燃料極側の触媒材料の塗布を行 った.その際の乾燥温度を変化させた.その後,作製した 触媒層を用いて DMFC の発電性能を測定し評価した.

2. 実験方法

2.1 触媒溶液の作製

図1のアノードである燃料極側に用いた溶液はPt-Ru/ C 粉末(20% on Vulcan XC-72)とNafion 溶液(Aldrich, 10 wt.% Nafion)中の固形分の重量比率が1:1になるよう混合し,固形分の重量が全体の1%になるよう70%エ タノール水溶液で希釈したものを用いた^{13,14)}. また図1



図1 直接メタノール形燃料電池の構造 Fig.1 Structure of direct methanol fuel cell.

のカソードとなる空気極側に用いた溶液は Pt/C 粉末 (20% on Vulcan XC-72) と Nafion 溶液 (Aldrich, 10 wt.% Nafion) 中の固形分の重量比率が 1:1 になるよう混合し, 固形分の重量が全体の 1%になるよう 70% エタノール水 溶液で希釈したものを用いた. その後, 燃料極・空気極 用の溶液共に超音波撹拌を 3 時間行い触媒溶液を得た.

2.2 静電噴霧法による燃料極側触媒層の作製

静電噴霧法により,燃料極側の触媒材料の塗布を行った.静電噴霧法によりカーボンペーパーに対して触媒材料を噴霧するための装置を図2に示す.本装置は溶液を噴射するためのノズル電極,溶液をノズル電極に供給するためのシリンジポンプ(TERUMO, CSP-100),堆積基板となる20mm×20mmのカーボンペーパー(東レ,TGP-H-605%Wet proofing),接地電極となる120mm×120mmのアルミ板,溶液に電圧を印加するための直流高圧電源,アルミ板を加熱するためのヒーター,ヒーターの温度を制御するための温度調節器(アズワン株式会社, EC-II)から構成される.

静電噴霧法により燃料極側の触媒溶液を 20 mm × 20 mm × 0.19 mm のカーボンペーパーに対して塗布を行い 燃料極側の触媒層を作製した. この時の噴霧条件として ノズル電極に印加する電圧は-8.0 kVとした. さらに, ノズル電極先端とカーボンペーパーの距離を 30 mm, ノ ズル電極に流す触媒溶液の流量を 0.5 m L/h とした. 用 いたノズル電極の内径は 0.8 mm, 外径は 1.4 mm とした. ヒーターの温度は温度センサ(三和電気計器株式会社, T-300PC)とデジタルマルチメーター(三和電気計器株 式会社, PC20)を用いて計測した. さらに温度調節器に より温度が一定になるように制御し、アルミ板の温度は 40℃~ 120℃まで 20℃ずつ変化させた. 静電噴霧時の 室内の温度はエアコンにより一定に制御した. 実験時の 室内の温度と湿度を表1に示す.静電噴霧による燃料極 側の触媒溶液の塗布は3.5時間行った.これは、カーボ ンペーパーに塗布された白金量が約1mgになるよう作 製するためである.静電噴霧法により触媒材料を乾燥温



図2 静電噴霧法による触媒層作製の概略図

Fig.2 Schematic of fabrication of catalyst layer by electrostatic spray.

表1 実	験条件	
Table 1	Experimental condition	

temperature	Relative humidity
20.0°C	78%
19.9°C	68%
20.0°C	63%
20.1°C	50%
19.1°C	70%
	temperature 20.0℃ 19.9℃ 20.0℃ 20.1℃ 19.1℃



図3 静電噴霧法により作製した触媒層の写真

Fig.3 Photo of the catalyst layer fabricated by electrostatic spray.

度 100℃で作製した結果を図3に示す.図3より点線は カーボンペーパーの位置を示しており,カーボンペーパ ーに対して触媒溶液が塗布されていることが分かる.そ して,他の乾燥温度での噴霧結果の形はほぼ同じであっ た.カーボペーパーに塗布された実際の白金量は以下の 式により算出した.

$$P_{t_{A}} = \frac{(S_{A} - S_{B})}{2} \times 0.2 \times \frac{2}{3} = \frac{0.2(S_{A} - S_{B})}{3} [mg]$$
(1)

ここで S_A は塗布した後のカーボンペーパーの重さを 示しており S_B は塗布する前のカーボンペーパーの重さ を示す. Nafion 溶液の固形分質量と Pt-Ru/C を重量比 1:1 で混合しているので $\frac{(S_A - S_B)}{2}$ [mg] が塗布された Pt-Ru/C の重さを示している. また, 係数 0.2 は Pt-Ru/C 中の Pt-Ru の割合を示しており, さらに係数 $\frac{2}{3}$ が塗布 された Pt-Ru 中の Pt の割合を示している. 燃料極側の 試料を作製した後、走査型電子顕微鏡(キーエンス、 VE-7800)により表面の観察を行った. さらに空気極側 の触媒層の作製は2.1節に示した空気極側の触媒溶液を 用いて行った. 空気極側の触媒層の作製は燃料極と同様 に 20 mm × 20 mm のカーボンペーパーに対してハケ塗 りによって塗布を行った.ハケ塗りによる空気極側の触 媒層の作製手順はスポイトにより空気極側の触媒溶液を カーボンペーパーに垂らし、ハケを用いて溶液をカーボ ンペーパー全体に引き伸ばしヒーター (Thermo Fisher scientific, HPA1914B) によって 110℃で乾燥させ、その 後自然冷却させた.この手順を触媒溶液中のPt/Cと Nafion の合計の重さが 40 mg になるよう繰り返し行っ た. 触媒層を乾燥させた際、カーボンペーパーの重さの 増加量が 40 mg だった場合 20 mm × 20 mm のカーボン ペーパーに対して4mgの白金が塗布された計算になる. 塗布された白金量は以下の式を用いて算出した.

$$P_{t_c} = \frac{(S_A - S_B)}{2} \times 0.2 = 0.1 \ (S_A - S_B) \ [mg]$$
(2)

ここで S_A は空気極側の触媒溶液を塗布した後のカー ボンペーパーの重さであり S_B が空気極側の触媒溶液を 塗布する前のカーボンペーパーの重さである. さらに Nafion 溶液の固形分質量と Pt/C を重量比 1:1 で混合して いるので $\frac{(S_A - S_B)}{2}$ [mg] が塗付された Pt/C の重さを示 し係数 0.2 が塗布された Pt/C 中の Pt の割合を示している.

2.3 DMFCの作製

使用した各部材の概略図を図4に示す.(a)のエン ドプレートは100 mm × 100 mmのアクリル板を用いて 作製した.エンドプレートは各部材をボルトにより固定 する役割を持つためボルトをはめ込むための Ø10 の穴を 8 か所作製した.(b)のセパレーターは 60 mm × 60 mmのステンレス鋼材(SUS316)を用いて作製した. メタノール燃料や空気が流れる流路の形状は蛇行型に し、流路の溝の幅は1 mm,溝の深さは0.5 mm で作製し た.(c)のガスケットは60 mm × 60 mmのものを用いた. ガスケットの中心にはセパレーターから触媒層にメタノ ール燃料や空気を供給できるよう20 mm 四方の穴を設 けた.(d)のイオン交換膜(デュポン社, Nafion117) は60 mm × 60 mmの大きさで Nafion117の膜抵抗を下 げるため0.5 mol/Lの硫酸に12時間以上浸したものを用 いた¹⁵⁾.(e)の触媒層は2.2節で示す方法で作製したカ ーボンペーパーと触媒層が一体のものを用いた.

これらの部材を用いて DMFC の組み立てを行った. そ れぞれの部材を用いて図 1 のように DMFC を組み立てた 後, ボルトにより部材の固定を行った. この時, ボルトは デジタルトルクレンチ (eclatorq,WP-030)を用いて 1.5 N/m の力で全てのボルトを締めて DMFC を完成させた.

2.4 DMFCの発電性能評価

組み立てた DMFC を用いて Cole-Cole プロットおよび 発電性能を評価した. DMFC の性能評価装置の概略図を 図 5 に示す. 燃料極側にはシリンジポンプ(TERUMO, CSP-100)を用いて純水で体積比率 3%になるよう希釈 したメタノール水溶液を流量 2.0 mL/min で供給した. 空気極側にはエアポンプを用いてエア流量 2000 mL/min



図5 DMFCの性能評価装置の概略図

Fig.5 Schematic of evaluation apparatus for performance of DMFC.



図4 DMFC の構成部品の概略図

Fig.4 Schematic of component parts of DMFC.

で供給し DMFC を発電させた.発電させた DMFC の Cole-Cole プロットおよび発電性能を FC インピーダンス メーター (菊水電子工業, KFM2005)を用いて測定した.

2.5 触媒層中の電解質劣化確認試験

触媒層作製時の熱による電解質の劣化を確認するため に温度による発電性能の影響を検討した.2.1節で作製 した燃料極側の溶液を用いて 60℃で触媒層をハケ塗り で 2枚作製し発電性能の測定を行った.その後,その触 媒層を 100℃および 120℃の温度で熱処理を行い発電性 能の測定を行った.熱処理を行った時間は静電噴霧を行 った時間と同じ 3.5時間である.

3. 実験結果

3.1 表面の観察

静電噴霧法により燃料極側の触媒層の作製をし、走査型 電子顕微鏡を用いて200倍の倍率で表面観察を行った結 果を図6に示す.図6の(a)~(e)の画像は40℃,60℃,80 ℃,100℃,120℃とそれぞれの乾燥温度で作製した試料を 示している.作製した試料の表面をそれぞれ比較してみる と、120℃の乾燥温度で作製した試料は表面に微粒子が堆 積していることが分かる.そして、120℃よりも低い乾燥 温度で作製した触媒層の表面を見てみると、徐々に堆積し ている粒子が大きくなり、40℃で作製した触媒層の表面は 微粒子状に塗布されていないことが分かる.このことから、 乾燥温度が上昇するにつれ触媒層の表面積が増加してい



図6 乾燥温度を変化させた時の燃料極側の SEM 画像

Fig.6 SEM images of anode when the drying temperature was changed.

ると考えられる.静電噴霧により生成された微粒子状の溶 液は,堆積基板であるカーボンペーパーに付着した時は溶 液中に溶媒が残留しており,ヒーターによる熱で溶液中の 溶媒を蒸発させている.そのため,乾燥温度が高いほど塗 布された粒子中の溶媒が速く揮発し溶液が粒子状に堆積 したと考えられる.反対に乾燥温度が低い場合,塗布され た溶液中の溶媒が揮発するのに時間がかかってしまう.そ れにより,溶液同士が凝集を起こし粒子の形状を保てず平 らな形状で堆積してしまうのだと考えられる.このことか ら静電噴霧法により触媒層を作製する場合,作製時の乾燥 温度が高い方が表面積が増加しやすいと考えられる.

3.2 Cole-Coleプロットによる作製した触媒層の評価

FC インピーダンスメーターにより Cole-Cole プロット を測定し作製した触媒層の評価を行った. Cole-Cole プ ロットとは複素平面上に交流インピーダンス法を用いて 周波数を変化させた時のインピーダンススペクトルを表 している¹⁶. 燃料電池の Cole-Cole プロットは一般的に 半円で描かれ、Cole-Cole プロットの位置や大きさによ って作製した触媒層のインピーダンスを評価し電気回路 としてモデル化できる. 燃料電池の等価回路と燃料電池 の一般的な Cole-Cole プロットを図 7 に示す. R_{i} は膜抵 抗と呼ばれ燃料電池の電気抵抗を示し Cole-Cole プロッ トの半円の位置に相当する. R。は活性化損失と呼ばれ化 学反応を起こす際に消費されるエネルギー損失を表し Cole-Cole プロットの半円の直径となる. C_a は電気二重 層容量と呼ばれ触媒と電解質の間に電荷が付着する現象 を表し計算によって算出される^{2,16)}. Cole-Cole プロット の半円と等価回路の関係は以下の式によって表される¹⁶.

$$Z = R_s + \frac{R_c}{1 + j\omega R_c C_d} \left[\Omega\right]$$
(3)

ここで Z は等価回路のインピーダンスを示し, j は虚数 単位を示す. さらに ω は等価回路に与える信号の角周波 数 [rad/s] を示している. 測定した Cole-Cole プロット を図 8 に示す. 40℃ ~ 120℃の乾燥温度で作製した触媒 層を用いた DMFC の Cole-Cole プロットを比較すると作 製時の乾燥温度が低くなるにつれて半円の位置が右にシ フトしているのが分かる. これは堆積基板の乾燥温度が



図7 DMFCの等価回路と Cole-Cole プロット Fig.7 Equivalent circuit of DMFC and Cole-Cole plot.



図 8 Cole-Cole プロットの結果 Fig.8 Results of Cole-Cole plot.

低い場合, 粒子状に堆積せず空間をあまり含まなくなる ため膜厚が薄くなるためと考えられる. そのため, 同じ 力で DMFC として固定してもイオン交換膜と密着しづ らくなる. よって, 作製時の乾燥温度が低くなると膜抵 抗 R. が増加すると考えられる. 反対に作製時の乾燥温 度が高いと触媒溶液が粒子状に堆積し空間を多く含むの で触媒層が厚くなると考えられる. 触媒層が厚くなると DMFC として組み立てた際, 厚みがある分イオン交換膜 と密着しやすくなり膜抵抗 R. が減少したと考えられる.

また、100℃の乾燥温度で作製した触媒層の半円が一番 小さいことが分かる. 半円が小さいということは乾燥温度 100℃で作製した触媒層を用いた場合,活性化損失 R。が小 さいことを意味する.活性化損失 R. は触媒層の表面積が 増加することで低下すると言われている²⁾. このことから, 100℃の乾燥温度で作製した触媒層の表面積は40℃~80 ℃の乾燥温度で作製した触媒層の表面積よりも大きいと考 えられる.しかし、120℃の乾燥温度で作製した触媒層の Cole-Cole プロットは 100℃の乾燥温度で作製した触媒層よ りも大きい. この要因として2つのことが考えられる. 1つ 目は触媒層中の Nafion の劣化である. Cole-Cole プロット の半円は電極が劣化することにより増大すると言われてい る.従って.120℃の乾燥温度で触媒層を作製した場合. 触媒層中の電解質である Nafion が熱によって劣化したの ではないかと考えられる. 2つ目の要因は溶液中の Pt-Ru/C と Nafion の比率が適切ではなかったのではないかと考え られる. 井上らの結果から燃料電池の性能には表面積に対 して適切な電解質の量が存在していることが明らかとなっ ている 17. そのため、今回の実験では増加した表面積に対 して電解質の量が適切ではなかったため触媒と電解質が接 しづらく発電性能が低下したのではないかと考えられる.

3.3 I-P特性の試験結果

FC インピーダンスメーターにより作製した触媒層の 発電性能の測定を行った.測定した DMFC の発電性能



図 9 I-P 特性の結果 Fig.9 Results of I-P characteristic.



図 10 電解質の熱劣化試験の結果 Fig.10 Results of degradation test of electrolyte.

を図9に示す.図9より,40℃~100℃までの発電性能 を比較すると、Cole-Cole プロットでの結果で比較した 時と同じように堆積基板の乾燥温度が高くなるにつれて 発電性能が向上していることが分かる.これは3.1節の 表面観察の結果と3.2節の Cole-Cole プロットの結果と 矛盾せず、これらの結果から乾燥温度が高いほど触媒層 の表面積が増加していると考えられる.しかし、3.2節 の Cole-Cole プロットの時と同じように120℃の乾燥温 度で作製した触媒層は100℃で作製した触媒層の発電性 能よりも下回る結果となった.これは、3.2節と同様に 熱によって触媒層中の Nafion が劣化してしまい発電性 能が低下してしまったか、静電噴霧法により塗布された 材料が分散しすぎてしまい触媒と電解質が接しづらくな り発電性能が低下してしまったと考えられる.

3.4 熱による電解質劣化の確認

熱による Nafion の劣化を確認するために触媒層作製時 の温度による影響を調べた結果を図 10 に示す. 燃料極も ハケ塗りで作製しているため図 9 の I-P 特性よりも発電電 力が小さくなっていることが分かる. 熱処理前ではどちら も同じ発電性能を有していたが, 熱処理を行った後, どち らの試料も発電性能が低下した. これは熱により, 触媒層 中の Nafion が劣化したためだと考えられる. ここで劣化 とは Nafion が分解され電解質としての性能を低下させる ことを指す. 温度が高い 120℃の方が発電性能の低下の割 合が大きく熱により Nafion の性能が低下していることが 分かった. このことから, 静電噴霧法により触媒層を作製 した際に乾燥時の熱により Nafion が劣化してしまうことが 発電性能低下の大きな要因であると考えられる.

4. まとめ

本研究では静電噴霧法により堆積基板の乾燥温度を変 化させて DMFC 用の触媒層を作製した.得られた知見 を以下に示す.

- (1)堆積基板の乾燥温度を変化させて触媒層を作製し SEMにより表面の観察を行った.その結果,乾燥 温度が高くなるにつれ表面に堆積している粒子が細 かくなっている様子が観察できた.これは触媒溶液 が堆積基板に塗布された際,乾燥温度が高いほど早 く溶媒が揮発し溶液が粒子状に堆積されていったた めだと考えられる.堆積基板の乾燥温度が低い場合 は溶媒の揮発が遅くなり塗布された溶液同士が凝集 し表面が粒子状に堆積しなかったと考えられる.
- (2) それぞれの乾燥温度で作製した触媒層を DMFC とし て運転し Cole-Cole プロットおよび発電性能を測定 した. その結果, 乾燥温度 40℃~100℃の範囲では 乾燥温度が高くなるにつれて Cole-Cole プロットの半 円が小さくなっていった. このことから, 乾燥温度 が高くなるにつれて触媒層の表面積が増加し、活性 化損失 R。が減少したと考えられる.しかし,乾燥温 度120℃で触媒層を作製した場合100℃で作製した触 媒層よりも Cole-Cole プロットの半円が大きくなっ た. これは熱により電解質の劣化が起こったためだ と考えられる. 実験結果 3.4節より 100℃で熱処理を 行うよりも120℃で熱処理を行う方が発電性能が低 下する割合が大きいことが明らかとなった. このこ とから、静電噴霧法を用いて120℃で触媒層を作製 した場合,作製中に触媒層中の Nafion が熱により分 解されて劣化したため Cole-Cole プロットの半円が 大きくなり発電性能が低下したと考えられる.

以上の結果より,静電噴霧法を用いて DMFC 用の触媒 層を作製する場合,堆積基板の乾燥温度が 100℃よりも 高い場合発電性能が低下することが分かった.今後は 120℃の乾燥温度で作製した場合,性能が低下してしまう 要因の1つと考えられる材料の分散の検討を行う.また, 表面積を定量的に測定することで,今回得られた発電性 能の傾向と基板の乾燥温度を変化させた時の表面積の増 加傾向を比較し今回の実験結果の妥当性を検討する.

参考文献

- 内藤勝之:モバイル機器用ダイレクトメタノール形燃料 電池.高温学会誌,35[5](2009)245-249
- James Larminie Andrew Dicks 共著 槌屋治紀 訳: 解説燃料 電池システム, pp.6-9,64-65,75-77, オーム社 (2006)
- A.M. Chaparro, P.Ferreira-Aparicio, M.A.Folgado, A.J. Martin, L.DAZA:Ctalyst layers for proton exchange membrane fuel cell prepared by electrospray deposition on Nafion membrane. Journal of Power Sources, **196** [9] (2011) 4200-4208
- MARTIN S., GARCIA-YABARRA P.L., CASTILLO J.I.: Electrospray deposition of catalyst layers with ultla-low Pt loadings for PEM fuel cell cathodes. Journal of Power Sources, 195 [9] (2010) 2443-2449
- 5) MARTIN S.,GARCIA-YABARRA P.L.,CASTILLO J.I.: High platinum utilization in ultra-low Pt loaded PEM fuel cell cathodes prepared by electrospraying. International Journal of Hydrogen Energy 35 [19] (2010) 10446-10451
- 6) S.Martin, B.Martinez-Vazquez, P.L. Garcia-Ybarra, J.L.Castillo: Peak utilization of catalyst with ultra-low Pt loaded PEM fuel cell electrodes prepared by the electro spray method. Journal of Power Sources, 229 (2013) 179-184
- B.Martinez-Vazquez, D.G.Sanchez, J.L.Castillo, K.A.Friedrich, P.L.Garcia Ybarra: Scaling up and characterization of ultralow-loading MEAs made up by electrospray. International Journal of Hydrogen Energy 40 [15] (2015) 5384-5389
- A.M. Chaparro, M.A. Folgado, P.Ferreira-Aparicio, A.J.Martin, I. Alonso-Alvarez, and Daza: Properties of Catalyst Layers for PEMFC Electrodes Prepared Electrospray Deposition. Journal of Electrochemical Society, 157 [7] (2010) B993-B999
- BENITEZ R., SOLER J., DAZA L.: Novel method for preparation of PEMFC electrospray technique. Journal of Power Sources, 151 (2005) 108-113
- 10) A.M. Chaparro, B.Gallardo, M.A.Folgado, A.J. Martin, L.DAZA: PEMFC electrode preparation by electrospray : Optimization of catalyst load and ionomer content. Catalyst Today, 143 [3-4] (2009) 237-241
- 11) LENGORO.I.W, 奥山喜久夫:静電噴霧法による液滴およ びイオンの発生.紛体工学誌, 137 [10] (2000) 753-760
- M.Cloupeau, B.Prunet-Foch: Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes. Journal of Electrostatics, 25 [2] (1990) 165-184
- 13) 江頭雅之,三上智士,山岡昴大,矢澤翔大,工藤祐輔 蒔田鐡夫:静電噴霧法による DMFC 用 MEA 作製.静電 気学会講演論文集,2015 (2015) 233-234
- 14) 江頭雅之, 白川雄基, 矢澤翔大, 工藤祐輔, 蒔田鐵夫: 静電噴霧法を用いた DMFC 用触媒層の作製条件の検討. 静電気学会講演論文集, 2016 (2016) 155-156
- 15) UMEDA Minoru, KAWAGUCHI Syunsuke, UCHIDA Isamu: Characterization of Membrane Electrode Assembly for Fuel Cells Prepared by Electrostatic Spray. Jpn J App Phys, 45 [7] Part1 (2006) 6049-6054
- 16) 板垣昌幸:電気化学インピーダンス法 第2版 原理・測定・解析, pp.4,61-62,81-82, 丸善出版 (2014)
- 17) INOUE H, DAIGUJI H, HIHARA E: The Strucure of Catalyst Layers and Cell Performance in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. JSME Int J Ser B, 47 [2] (2004) 228-234