

固体高分子形燃料電池の空気極流路内の水滴挙動計測

Measurements of Water Droplet Behavior in Cathode Channel of Polymer Electrolyte Fuel Cell

●
江尻 英治
機械サイエンス学科 教授
鈴間 一平
ヤマハ発動機(株)(2009年機械サイエンス専攻修了)
田所 諒一
富士電機(株)(2011年機械サイエンス専攻修了)

●
Eiji EJIRI
Dept. of Mechanical Science and Engineering, Professor
Ippei SUZUMA
Yamaha Motor Co. Ltd.
Ryoichi TADOKORO
Fuji Electric Co. Ltd.

●
2013年9月20日受付

●
Received : 20 September 2013

Water management inside a polymer electrolyte fuel cell has been regarded as one of the most important issues to be addressed. This is because both a shortage of supplied gases in highly humidified areas and a decrease in ion conductivity in low humidified areas cause deterioration in power generation performance and material durability. In this paper, intensive studies were conducted using a single cell visualization setup regarding investigations on how the water droplet behavior in the cathode channel varies depending on the channel cross-sectional aspect ratio, the wettability of the channel wall and the operating conditions. The visualized water droplet behavior was analyzed in conjunction with the output voltage and the measured upstream and downstream pressures. The basic water droplet characteristics, such as the discharge frequency, the velocity and the diameter, were also investigated with the PTV method.

キーワード：燃料電池，固体高分子形，水滴，濡れ性，PTV

1. はじめに

燃料電池は、水の電気分解の逆反応によって、水素と酸素から電気を取り出す装置である。排出されるものは水だけであるので、クリーンで高効率な再生可能エネルギーシステムとして近年研究開発が盛んに行われている。その中でも固体高分子形燃料電池(PEFC)は、80℃前後の比較的低温で作動し、取り扱いが容易であるので、家庭用コージェネレーション(商品名:エネファーム)や燃料電池自動車(FCV)用電源として現在ほぼ実用化の段階に進みつつある。

PEFCでは、高加湿運転時の凝縮水によるガス供給不良(フラッディング)や低加湿運転時の電解質膜のイオン伝導率低下(ドライアウト)が起こることがある。これらの状況下では、発電性能が低下したり、材料が劣化しやすくなるため、電池内部の水管理はPEFC実用化のための最重要課題の一つとされてきた。これまでに可視化用単セルを用いて、運転条件によるガス流路内の水分状況や出力

電圧の変化が調べられている^{1) 2) 3)}。ごく最近では中性子線ラジオグラフィ^{4) 5) 6) 7)}、X線CT^{8) 9) 10)}、MRI¹¹⁾などの手法を用いて、高分子膜やガス拡散層内部の水分量分布の計測結果が報告されている。当然のことながら、これらの計測には高価な装置と特殊なノウハウが必要になる。

本報告は比較的簡便な装置を用いて高加湿運転時の流路内の水滴挙動について情報を得ることを目的とするものである。その前半では、流路条件(断面のアスペクト比と壁面の濡れ性)や運転条件(電流密度と空気利用率)が、水滴挙動と発電性能に及ぼす影響を調査した。後半では、流路内の水滴挙動を定量的に計測するために、蛍光粒子を含ませた水滴を流路に導入し、いわゆる蛍光落射システムを用いてその排出過程を撮影した。さらに、得られた画像データをPTVで解析し、水滴の大きさ、移動速度、排出頻度などの計算を行った。

2. 実験装置と実験方法

2.1 水の発生メカニズム

図1にPEFCの作動原理を示す。燃料極流路から供給された水素は燃料極の触媒によって水素イオン(プロトン)と電子に分かれる。電子は外部回路の負荷を通過して仕事をした後、空気極に至る。プロトンは電解質膜を通過し、空気極の触媒によって空気中の酸素及び外部回路を通過してきた電子と反応して水を発生する。発生した水の多くはカーボン繊維などからなる多孔質のガス拡散層(GDL)を通過して空気の流れる流路に現れる。この水は、電池の低負荷(低電流)運転時には水蒸気であるが、高負荷(高電流)運転時には液水となる。この液水はGDL表面に凝縮するので、そのまま排出されなければ反応に必要な酸素の取り込みが阻害され、発電性能の低下、電解質膜や触媒などの材料の劣化につながる。

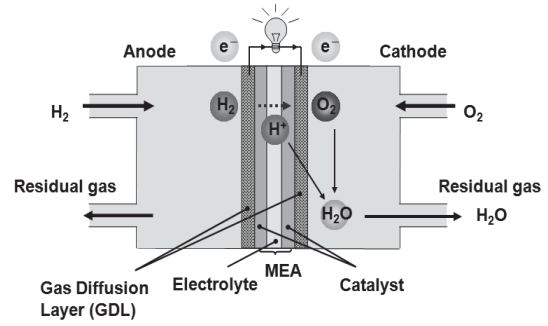


図1 固体高分子形燃料電池の作動原理

2.2 水滴挙動の定性的計測

図2に本研究で使用した可視化用単セルの部品構成を概念的に示す。空気極側のエンドプレートに観測窓を開け、空気極セパレータの流路は貫通長穴とし、それらに無色透明の亚克力プレートを挟むことで空気極流路の観察が可能となっている。セパレータ表面は腐食防止のために金メッキ加工がされており、集電板を兼ねる。なお、電解質膜の両側に白金触媒を担持させたものを一般にMEA(膜/電極接合体)と呼んでいる。

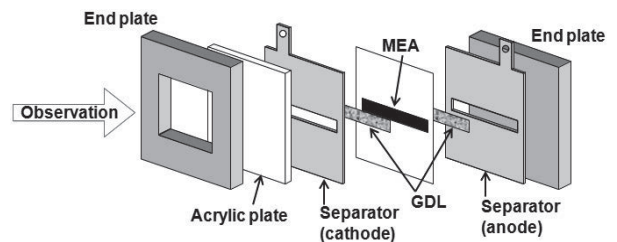
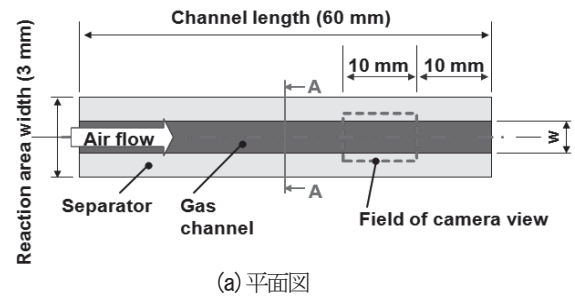
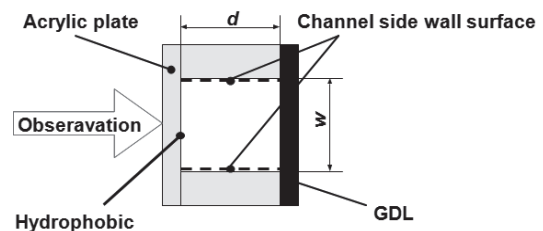


図2 供試単セルの部品構成

図3(a)に観測窓から見た流路の形状を示す。流路は全長60mmの直線一本流路で、流路入口から40mm~50mmの範囲を観察した。図3(b)に示すように流路断面は矩形で、断面積がほぼ一定でアスペクト比(d/w)を変えた3種($w \times d = 1.4 \times 0.7, 1.0 \times 1.0, 0.7 \times 1.4$)の供試体を製作した。触媒の反応面積は $3 \times 60 = 180 \text{mm}^2$ で、GDLには撥水処理を施した厚さ $200 \mu\text{m}$ のカーボンペーパー(東レTGP-H-060H)を使用し、図3(b)の流路上下壁面に撥水処理または親水処理を施した。表1に示すように、断面形状と濡れ性の組み合わせで合計6種の流路を使用した。参考に、本実験と同一の親水処理及び撥水処理を施した金属片に、水滴を落とした様子を図4に示す。図中の θ は接触角である。なお、水蒸気による曇りを防ぐため acrylic の観測窓内面には撥水処理を施した。



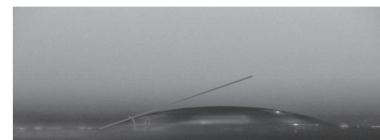
(a) 平面図



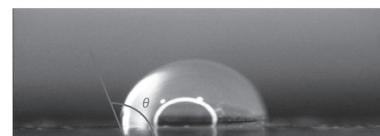
(b) 断面A-A

図3 空気極流路の詳細

図5に発電実験のシステム図を示す。空気及び水素は高圧ボンベから供給し、マスフローコントローラによって流量制御を行い、バブラーによって加湿を行った。電流の制御は電子負荷装置によって行った。なお、観測窓外面の曇りを防ぐために単セル全体を恒温槽内に入れ、この恒温槽



(a) 親水性壁面 ($\theta \approx 25^\circ$)



(b) 撥水性壁面 ($\theta \approx 105^\circ$)

図4 壁面上の水滴形状

表1 流路断面形状と壁面濡れ性の組み合わせ

流路	A1	A2	B1	B2	C1	C2
$w \times d$	1.4 × 0.7		1.0 × 1.0		0.7 × 1.4	
濡れ性	親水	撥水	親水	撥水	親水	撥水

に取り付けたデジタルカメラ付きの実体顕微鏡で観察を行った。運転条件は、単セル温度 60℃、ガス湿度 80%RH とし、負荷電流密度 I_0 は 200mA/cm² または 500mA/cm²、空気利用率 U_a は 12% または 30% とした。負荷電流密度とは、触媒の単位面積あたりに流れる電流の値を示す。空気利用率とは、供給された空気に含まれる酸素のうちどのくらいの割合の酸素が反応に使われたかを示すパラメータである。したがって、空気利用率が小さいほど空気を過剰に供給していることになる。

2.3 水滴挙動の定量的計測

排出される水滴の挙動を定量的に計測するためには、まず画像データから水滴のみを抽出して認識し、次にこの水滴の中心部の動きを追跡することが必要である。前者には生体細胞の観察に用いられる蛍光落射撮影、後者には流体力学で用いられる PTV (Particle Trajectory Velocimetry) をそれぞれ適用した。

本実験のシステムを図 6 に示す。試験部は、図 2 に示す単セルから燃料極と MEA を取り除き、エンドプレートに穿たれた一つの小穴から水を送液する構造としたものである。水の流量を $Q_w=1\mu\text{L}/\text{min}$, $5\mu\text{L}/\text{min}$, $10\mu\text{L}/\text{min}$ とし、マイクロシリンジポンプで送液した。なお、 $Q_w=1\mu\text{L}/\text{min}$ は、電流密度が $I_0=100\text{mA}/\text{cm}^2$ のときに反応で発生する水分量にほぼ相当する。空気は高压ポンプの乾燥空気をレギュレータで減圧し、無加湿で 25℃ 一定の条件で供給した。表 2 に供給する水と空気の条件を示す。空気流量は等価空気利用率 U_a に 40%, 60% の 2 条件を設定し、供給する水の流量と併せ合計 6 条件で実験を行った。表 2 には、それぞれの空気流量から算出される流路内の平均空気流速も示してある。

蛍光落射撮影⁽¹²⁾とは、水銀ランプなどを励起光に用い、サンプルの自家蛍光発光を観察するものである。撮影には CCD カメラ (OLYMPUS DP71, フレームレート 15fps)、実体顕微鏡 (同 SZX7)、水銀ランプ (同 U-LH100HG) を使用した。水に含有させる蛍光粒子は、粒子径 0.4 μm 、励起波長 468nm (緑) のものを使用した。水銀ランプの光を蛍光フィルターに通すことで蛍光粒子の励起波長である 468nm の光が得られ、この波長の光を照射することにより水滴中の蛍光粒子は 508nm の波長で発光する。この発光する蛍光粒子を十分に含ませた水滴を CCD カメラで撮影する。なお、発光している蛍光粒子のみが画像として

表 2 水流量と空気流量の組み合わせ

条件	1	2	3	4	5	6
等価電流密度 [mA/cm ²]	100		500		1000	
水流量 Q_w [$\mu\text{L}/\text{min}$]	1		5		10	
等価空気利用率 [%]	40	60	40	60	40	60
空気流量 [NL/min]	0.047	0.031	0.233	0.156	0.466	0.312
平均空気流速 [m/s]	0.77	0.52	3.9	2.6	7.7	5.2

取り込まれるよう、装置の周囲を暗幕で覆い、外部から入る光を遮蔽した。

PTV⁽¹³⁾とは、全体画像からトレーサ粒子の画像だけを抽出し、近接する 2 時刻での粒子の形状・位置関係をも

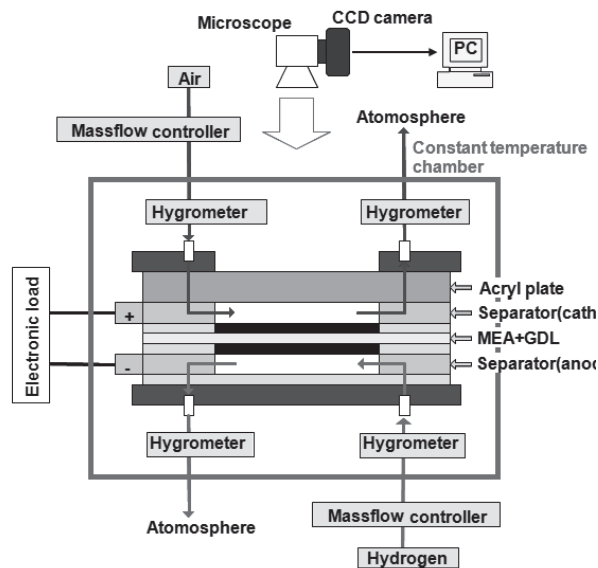


図 5 発電実験のシステム図

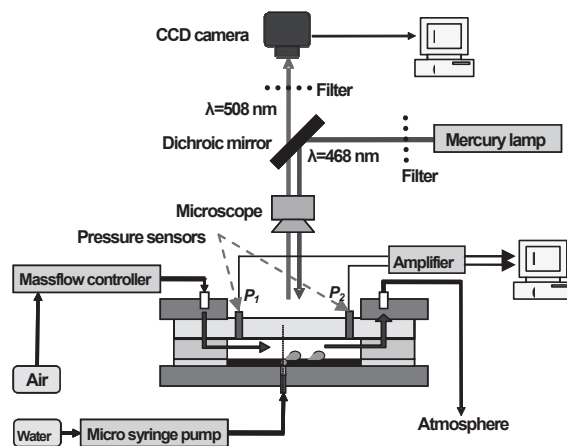


図 6 蛍光落射撮影システム

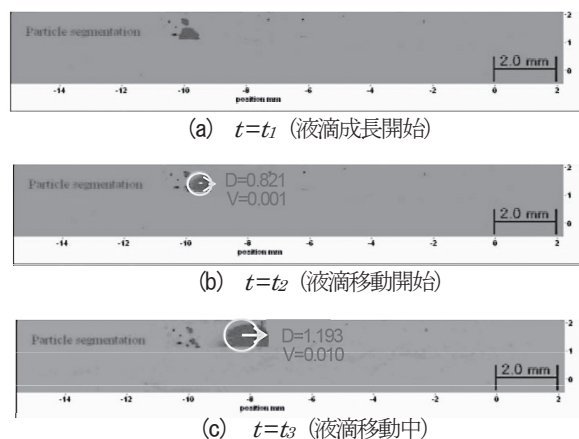


図 7 PTV 解析結果の表示例

とに、対応した粒子の移動距離から流速を算出して表示する可視化手法である。本実験の場合は、水滴画像の等価円の中心位置を追跡することになる。画像データ解析にはPC用ソフトウェア(LaVision DAVIS7)を用いた。図7に、ある条件の下で得られた、3時刻 t_1 (液滴成長開始), t_2 (液滴移動開始), t_3 (液滴移動中) に対応した蛍光撮影画像とPTV解析結果を重ねて示す。円の直径が、解析ソフトウェアが認識した水滴の等価円直径 D (mm) で、矢印の長さが水滴の速度 V (m/s) を示している。なお、等価円は液滴輪郭の包絡円で定義される。流路内部の流れの状態をモニターするために、液水供給部の上流側と下流側に、50mmの間隔をあけて2本の圧力センサー(Kulite XCL-100SG)を取り付けた。圧力センサーの出力信号はアンプによって増幅し、データロガー(KEYENCE NR-500, NR-HA08)で取り込み、PCで処理した。

3. 実験結果と考察

3.1 流路断面形状と壁面濡れ性の影響

図8に、断面形状と壁面濡れ性の異なる流路における $I_0=500\text{mA/cm}^2$, $U_a=30\%$ での発電開始から900s経過までの出力電圧の時間履歴を示す。まず断面形状の違いで比較すると、幅広で浅い流路A1およびA2が最も安定して連続の運転ができた。正方形断面の流路B1およびB2では、流路A1およびA2よりも出力電圧が低下するだけでなく、瞬間的に出力電圧が大きく低下した後急激に回復するパターンの変動を繰り返した。幅狭で深い流路C1およびC2では、どちらも試験開始後すぐに電圧が低下し始め、その後100s足らずで発電が停止した。図9(a)および(b)に、流路C1およびC2における発電停止直前の流路内部の様子を示す。これらの図より流路には特に大量の水滴が存在しているわけではないので、この条件では見えている水滴だけで発電性能が論じられないことがわかる。これらの流路では流路に露出しているGDL面積が小さいため、壁

面濡れ性の如何にかかわらず水滴がGDL内部に滞留してしまうものと考えられる。

次に図8で壁面濡れ性の違いを比較すると、親水性の流路A1およびB1は、対応する撥水性の流路A2およびB2に比べて電圧の変動が小さく、安定して運転できる傾向がある。図10に親水性の流路B1における出力電圧の250s間の時間履歴を示す。また、図10の3時刻に対応した流路内の水滴発生状況を図11(a)~(c)に示す。これらの図から、親水性流路では比較的大きな水滴が壁面に貼りつくように少数存在し、その数の増加とともに出力電圧は徐々に低下していくが、水滴が壁面に沿って一気に排出され、そのときに電圧が回復することがわかる。図12に撥水性の流路B2における出力電圧の250s間の時間履歴を示す。また、図12の3時刻に対応した流路内の水滴発生状況を図13(a)~(c)に示す。これらの図から、撥水性流路では比較的小さな水滴が多く存在し、その数の増加とともに出力電圧は徐々に低下していくが、ある程度溜まると一気に排出され、電圧が回復することがわかる。ただし、図8からわかるように水滴の排出頻度は親水性流路のそれに比べてずっと多い。

3.2 電流密度と空気利用率の影響

図14に、電流密度 $I_0=200\text{mA/cm}^2$ 一定の条件で空気

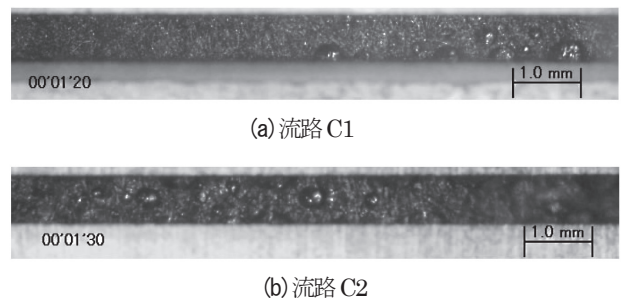


図9 発電停止直前の流路内部の様子

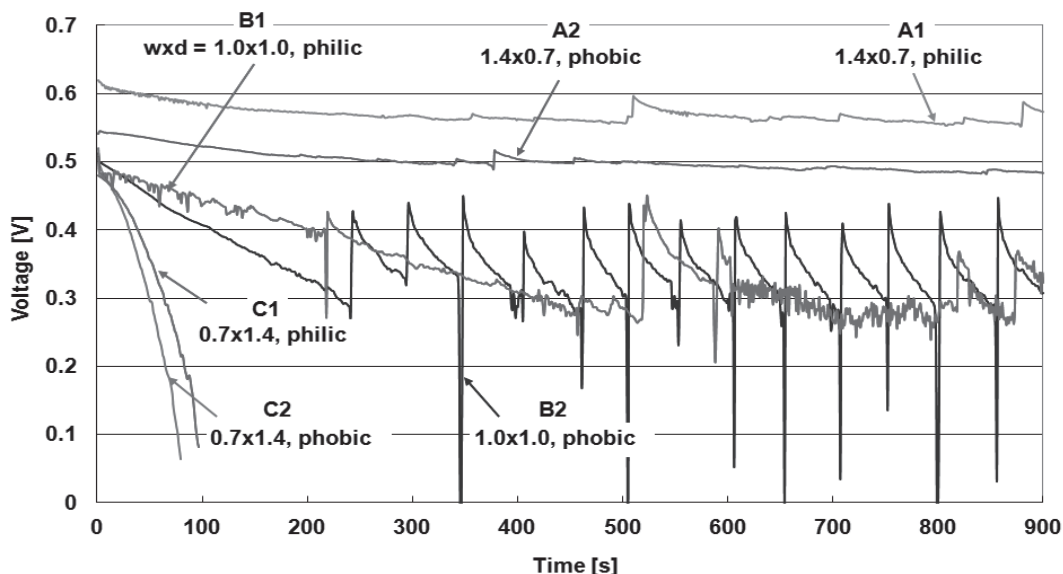


図8 $I_0=500\text{mA/cm}^2$, $U_a=30\%$ での出力電圧の時間履歴

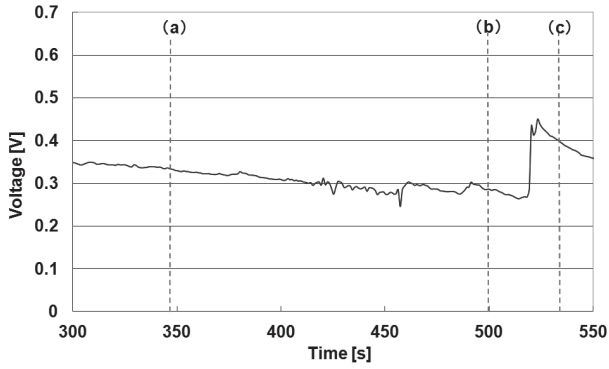


図10 流路 B1における出力電圧の時間履歴

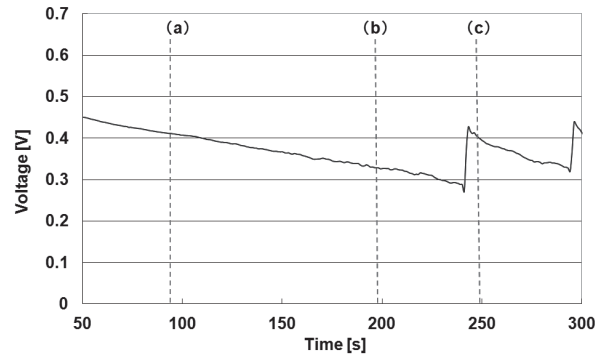


図12 流路 B2における出力電圧の時間履歴

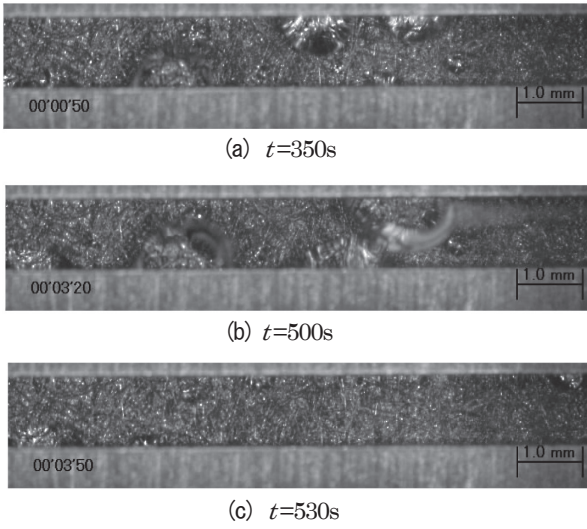


図11 流路 B1の内部の様子

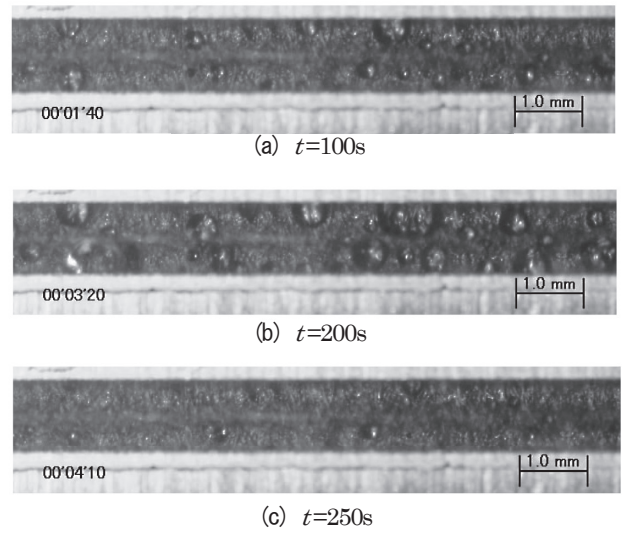


図13 流路 B2の内部の様子

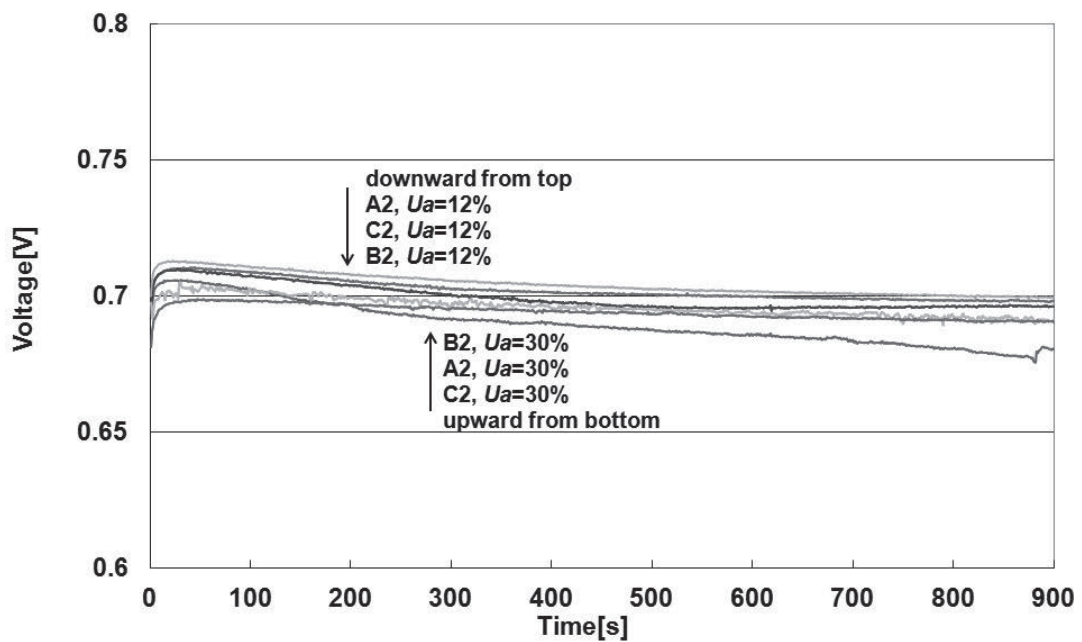


図14 $I_0=200 \text{ mA/cm}^2$ における出力電圧の時間履歴

利用率 U_a を変えて運転したときの、発電開始から 900s 間の出力電圧の時間履歴を示す。実験には撥水性の流路 A2, B2 および C2 を使用した。電流密度が比較的低いこの条件では、流路断面形状や空気利用率 U_a によって出力電圧のレベルに大きな差がないことがわかる。また、流路内においても水滴が確認できなかったため、電流密度 $I_0=200\text{mA}/\text{cm}^2$ の条件では水は主として水蒸気として排出され、発電性能に影響するほどの量の液水は生成されていないと考えられる。

図 15 に、電流密度 $I_0=500\text{mA}/\text{cm}^2$ 一定の条件で空気利用率 U_a を変えて運転したときの、発電開始から 900s 間の出力電圧の時間履歴を示す。実験には撥水性の流路 A2, B2 および C2 を使用した。幅広で浅い流路 A2 では、空気利用率の減少によって出力電圧が 0.1V 程度上昇する。正方形断面の流路 B2 では、空気利用率の減少によって出力電圧が上昇するだけでなく、周期的で大きな電圧変動がなくなる。幅狭で深い流路 C2 の場合、空気利用率 $U_a=30\%$ では実験開始後まもなく電圧が低下し始めて発電が停止したものが、 $U_a=12\%$ では継続的に運転が可能となる。以上のことから、どの流路についても空気利用率 $U_a=12\%$ では、空気利用率 $U_a=30\%$ のときに比べて出力電圧は高くなり、変動は小さくなる傾向があることがわかる。

一般に電流密度が高くなるとそれに比例して発生する水分量も増加するので、出力電圧のレベル低下だけでなく、安定性低下など、水分発生による性能低下は高負荷の運転条件で深刻な問題となる。この問題に対する一つの対策として、空気利用率を小さく（空気の流量、すなわち流速を大きく）して、積極的に流路内の水滴の吹き飛ばすという方法がある。これによって、流路内が多少フラッディング気味の状態であっても空気を多く流すことで安定して運転で

きる。本研究のように触媒反応面積を一定とし、流路断面のアスペクト比 d/w を変化させた場合でもこの方法が有効であることがわかる。

3.3 PTVによる水滴運動の計測

図 16 に、正方形断面の撥水性流路 B2 を用いて、等価空気利用率 $U_a=60\%$ 、等価電流密度を $I_0=100\text{mA}/\text{cm}^2$ として得られた圧力センサーの計測結果（図の上段）と PTV 解析結果（液滴速度－図の中段、等価液滴直径－図の下段）とを示す。図 16 の下段に示される等価液滴直径は、液滴が流路に現れた直後は不安定であるが、その後 1mm から 1.7mm（流路幅が 1mm なので、液滴が長円状になっていることを示している）まで時間に対してほぼ線形に成長してゆき、ある瞬間に認識されなくなることを示している。一定の流量で送液された水は液滴となって流路に現れて成長し、一定の大きさになると空気の流れによって 65 秒程度の周期で規則的に下流に排出されていることがわかる。図の中段では、液滴が成長する間に数 mm/s の速度で移動していくのがとらえられているが、ある瞬間に空気流（断面内平均速度は 2.6m/s）によって吹き飛ばされ、その時 2cm/s 程度の大きな値を示す。図の上段に示される入口と出口の圧力は、ともに液滴が排出される瞬間にほぼ同時にピークを示す。

表 2 に示す 6 条件の下で計測した水滴の排出頻度 (min^{-1}) を、等価電流密度との関係で図 17 に示す。いずれの流路断面形状でも、水滴の排出頻度は等価電流密度とともに増加している。これらは供給される水の量が多い（同時にそれに比例して空気流速も大きくなる）ほど水滴の排出頻度が高くなることを意味しており、極めて妥当な結果である。流路断面形状の違いでみると、正方形断面の流路

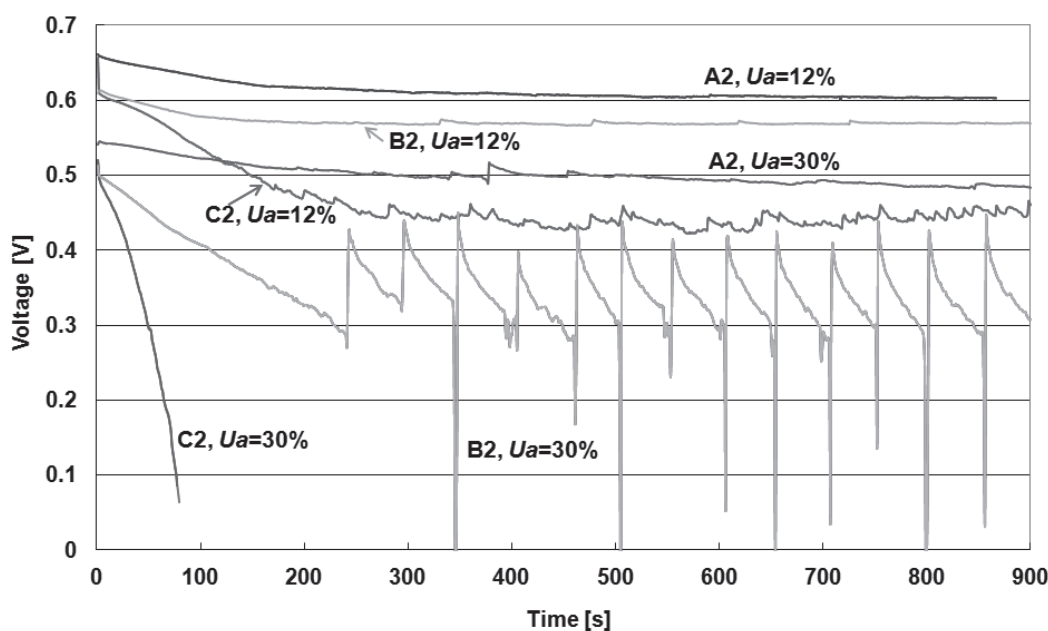


図 15 $I_0=500\text{mA}/\text{cm}^2$ における出力電圧の時間履歴 (U_a による違い)

では、他の流路に比べて水滴の排出頻度が著しく高い。これは、断面が正方形でない流路では、水滴が壁面に触れやすくなり移動の抵抗となるためと考えられる。等価空気利用率で比較すると、正方形断面の流路では $U_a=40\%$ のときの方が $U_a=60\%$ のときに比べて排出頻度が 20% 程度高くなっているが、これは平均空気流速が 50% 程度大きくなることを考えると妥当な傾向といえる。しかし、断面が正方形でない流路では、等価空気利用率によって排出頻度の傾向はあまり変わらない。これは空気が水滴に及ぼす影響よりも流路壁面の粘性が水滴に及ぼす影響の方が、水滴移動の現象を大きく支配しているためではないかと推定される。

図 18 に、正方形断面の流路で水滴排出時の最大速度と等価電流密度との関係を示す。最大速度は等価電流密度にほぼ比例しており、また等価空気利用率の減少によって増加するが、平均空気流速に比例しているわけではない。図 19 に正方形断面の流路における最大等価液滴直径と等価電流密度との関係を示す。等価電流密度の増加に対し、液滴径はゆるやかに減少していく。空気流速の増加に伴い、水滴が大きく成長する前に吹き飛ばされて排出されることがわかる。等価空気利用率が増加すると、空気流速は減少し、水滴はより大きく成長して排出されることが示されている。

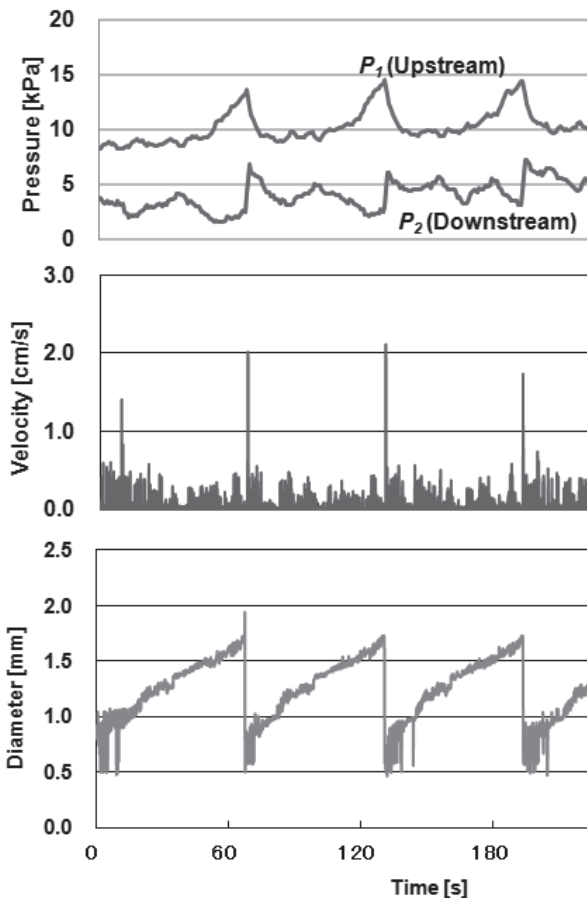


図 16 $I_0=100 \text{ mA/cm}^2$ で計測された圧力 (上段) と PTV 解析結果 (中段: 液滴速度, 下段: 液滴等価直径)

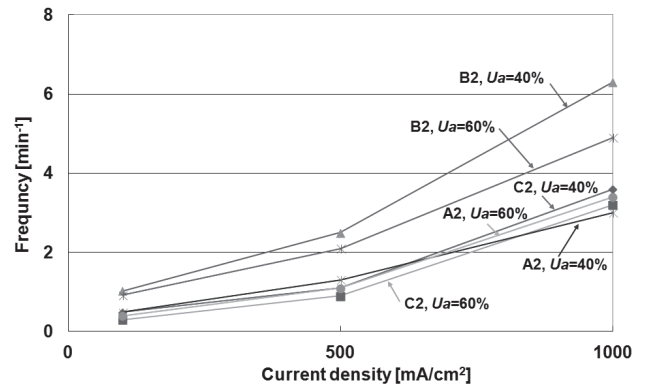


図 17 計測された水滴の排出頻度

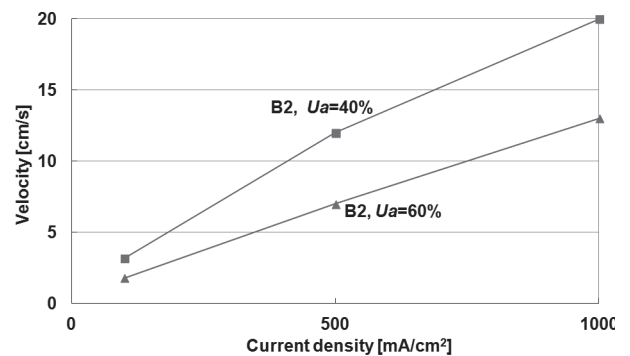


図 18 計測された水滴の最大排出速度

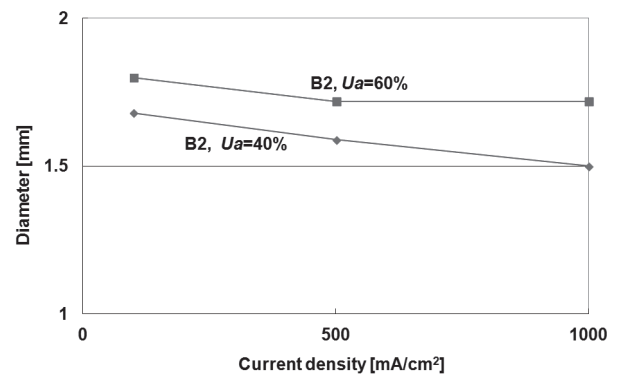


図 19 計測された水滴の最大等価直径

4. まとめ

固体高分子形燃料電池の直線 1 本流路からなる可視化単セルモデルを用いて、流路断面のアスペクト比と流路壁面の濡れ性が、発電時の空気極流路内の水滴挙動と出力電圧に及ぼす影響を調べた。その結果次のようなことがわかった。

(1) 比較的高負荷の運転条件では、幅広で浅い流路では水滴の排出が観察されるものの、出力電圧は高く、安定した運転ができる傾向がある。一方、正方形断面あるいは幅狭で深い流路では液滴の排出と同期した不安定な出力電圧となるか、短時間での電圧降下をきたす。また流路壁面を親水性にすることで毛細管現象により水滴の排出が促進さ

れ、出力電圧が安定し長時間運転が可能となる傾向がある。空気利用率を小さくして、積極的に流路内の水滴の吹き飛ばす方法は、フラッシングを避け安定して運転するのに有効である。

(2) 一方、比較的低負荷の運転条件では、流路内に水滴が溜まりにくく、流路断面形状や壁面の濡れ性が出力電圧に及ぼす影響はほとんどない。

非発電時に電流密度や空気利用率を実機と等価とする条件で水や空気を流路内に供給し、発生する水滴に対してPTV解析を行った結果、さらに次のことがわかった。

(3) どのアスペクト比の断面流路でも、供給水量にほぼ比例した頻度で水滴が排出される。正方形断面の流路では、長方形断面の流路に比べて水滴の排出頻度が高く、空気流量の影響を受けやすい。

(4) 水滴の排出速度は等価電流密度にほぼ比例し、等価空気利用率の減少ともなって増加する。等価水滴径は等価電流密度の増加とともに減少し、等価空気利用率の増加に伴い増加する。

(5) 水滴と壁面の干渉が小さい場合は、直線1本流路からなる可視化単セルモデルと蛍光粒子をトレーサとするPTV解析を併用することにより、流路の水滴の成長、移動、排出の様子が定量的に捕らえられることが示された。

謝辞

本研究は、NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発/次世代技術開発/粒子法を用いた直接シミュレーションによる流路・拡散層内のガス・水滴輸送挙動の研究」の支援により実施した成果を一部含んでいる。関係各位の皆様にご感謝申し上げます。

参考文献

- (1) H. Masuda, A. Yamamoto, K. Sasaki, S. Lee and K. Ito, A visualization study on relationship between water-droplet behavior and cell voltage appeared in straight, parallel and serpentine channel pattern cells, *Journal of Power Sources*, 196, (2011) pp.5377-5385.
- (2) I. S. Hussaini and C.-Y. Wang, Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 187, (2009) pp.444-451.
- (3) K. Tüber, D. Póca, C. Hebling, Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 124, (2003) pp.403-414.
- (4) D. Spornjak, S. G. Advani and A. K. Prasad, Simultaneous Neutron and Optical Imaging in PEM Fuel Cells and Energy Conversion, *Journal of Electrochemical Society*, 156 (1), (2009) B109-B117.
- (5) R. S. Fu, U. Pasaogullari, T. Shiomi, Y. Tabuchi, D. S. Hussey and D. L. Jacobson, High-Resolution Neutron Radiography of Through-Plane Liquid Water Distribution in Polymer Electrolyte Membrane and Gas Diffusion Layer, *Journal of Electrochemical Society*, 159 (9), (2012) F545-F553.
- (6) N. Pekula, et al., Study of water distribution and transport in a polymer electrolyte fuel cell using neutron imaging, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, Vol. 542, Issues 1-3, 21 April 2005, pp.134-141.
- (7) J. P. Owejan, et al., In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006) pp.4721-4731.
- (8) J. Hinebaugh, J. Lee and A. Bazylak, Visualizing Liquid Water Evolution in a PEM Fuel Cell Using Synchrotron X-ray Radiography Fuel Cells, *Journal of Electrochemical Society*, 159 (12), (2012) F826-F830.
- (9) I. Suzuma, E. Ejiri, M. Hirono, M. Takimoto, M. Yoneda, Measurements of Water Droplet Behavior in Gas Diffusion Layer of PEFC using X-Ray CT and Substance Microscope, *ECS Transaction*, 16 (24), (2009) pp.133-140.
- (10) C.-Y. Wang, et al, Liquid Water Formation and Transport in the PEFC Anode, *Journal of Electrochemical Society*, 154 (10), (2007) B988-B1005.
- (11) Z. Dunbar, R. I. Masel, Quantitative MRI study of water distribution during operation of a PEM fuel cell using Teflon® flow fields, *Journal of Power Sources*, 171 (2007), pp.678-687.
- (12) 野島博編, 顕微鏡の使い方ノート, 羊土社, (2011) pp.75-102.
- (13) 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, 森北出版, (2002) pp.82-95