薄形セパレータを用いた PEM 形燃料電池の性能影響因子評価*

高橋 浩^{*1}, 関口重幸^{*2}, 近久武美^{*3}Evaluation of Factors Influencing Performance of PEM Fuel Cell
with Thin Separator ChannelsHiroshi TAKAHASHI^{*4}, Shigeyuki SEKIGUCHI and Takemi CHIKAHISA^{**}IHI-shibaura Machinery Corporation,
1-1-1 Ishishiba, Matsumoto-shi, Nagano, 390-8714 Japan

The authors developed PEM fuel cells consisting of thin separators with the thickness of 0.8 mm. The paper investigates the dependence of cell performance on the gas diffusion layer (GDL) thickness, hydrophobic characteristics of GDL, binding contact pressure, channel depth, temperature and water content in the working gases. The result shows that the pressure losses increase inversely proportional to the third power of the channel depth and it increases significantly for the channel depth less than 0.2 mm. The best performance was obtained with a GDL which has relatively lower hydrophobic characteristics. It was also shown that better performance was obtained with relatively thinner GDL for the shallow channel depth of 0.3 mm used in the experiment. The paper also proposes a simple estimation of liquid water amount in the cell, which may be used for the control of water management.

Key Words: Fuel Cell, PEM, Water, GDL, Performance, Water Repellency, Channel Depth, Flooding

1. 緒 言

燃料電池は高効率および低エミッションのエネルギー変換機であり、移動用、定置用ならびに携帯用の動力源として多に期待されている。なかでも PEFC (固体高分子形燃料電池) は低温作動可能で、かつ出力密度が高い特徴を有しており、精力的に実用化開発が進められている⁽¹⁾。しかし、コスト低減、耐久性向上のほか、PEFC では水分管理技術の確立が課題となっている。すなわち、固体高分子形電解質膜ではイオン伝導度を保つために膜を適度な湿潤状態に保つ必要があり、加湿量が少なく電流密度が低い条件ではドライアウトが生じる一方、高電流密度条件では生成水が作動ガス流路やガス拡散層(GDL)内にたまり、ガス拡散を阻害する、いわゆるフラッディングが生じたりする。したがって、ドライアウトやフラッディングが生じにくく、必要最小限の供給ガス量で高い性能を発揮できる技術が求められている。

そのためこれまでに水分管理に関する多くの研究が行われている。例えば、恩田ら⁽²⁾は発電性能に対する電力損失要因を解析しており、吉川らは燃料電池性能に対する水分量の影響⁽³⁾や温度分布の影響⁽⁴⁾について報告している。また、岡崎ら⁽⁵⁾は燃料電池性能に対するガス流れの影響を報告しているほか、平井ら⁽⁶⁾は GDL 内での水分の微視的挙動観察を行っている。さらに、許斐ら⁽⁷⁾は可視化セルを用いてフラッディングと電圧との関係について解析しているほか、Tüberら⁽⁸⁾および Wang ら⁽⁹⁾は、可視化セルを用いてカソードのセパレータ流路上での水生成の挙動観察を行っている。

一方、燃料電池をコンパクト化し、出力密度の向上と同時にコスト低減を図るために、電池厚さの大部分を占めるセパレータ厚さを薄くすることが求められる。すなわち、電池セルは数十 μm の高分子膜・電極接合体(MEA)、0.3 mm 程度のガス拡散層(GDL)、および作動ガス流路溝をもつ厚さ数 mm 程度のセパレータの積層構造をもっており、セパレータ厚さを極力薄形とすることが電池サイズを小形化するうえで有効となる。前述した研究⁽²⁾⁻⁽⁹⁾は、いずれも溝深さが 1 mm の流路にての性能評価であり、1 mm 未満の溝についての水分影響評価の研究はわずかな報告例がある

* 原稿受付 2007 年 5 月 18 日。

^{*1} 正員, IHI シバウラ (☎ 390-8714 松本市石芝 1-1-1)。^{*2} IHI シバウラ。^{*3} 正員, フェロー, 北海道大学大学院工学研究科 (☎ 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)。

E-mail: takahasi@ism.ihi.co.jp

Fig. 1 Picture of 25 cm² separator and the cross section at the inlet to the separator channel of Cell I

程度である。高木らは、厚さ 0.6 mm の薄形セパレータを用いた実験結果を報告しており、出力密度向上の可能性のほか、ガス流路のはっ水性影響について報告している⁽¹⁰⁾。

以上、PEFC 内の水分影響やセパレータ薄形化に関する種々の研究はあるが、燃料電池のスタック性能はセパレータ溝深さや形状のほか、セルの構成部材である MEA および GDL が相互に関連して決まるので、運転条件を含めた多くのパラメータの相互影響を、多数の研究者によるさまざまな切り口から評価する必要がある。

そこで、本研究では実用化可能な薄形セパレータをまず試作し、電池性能に対する GDL のはっ水性、電池温度、電流密度、および供給ガス加湿条件の影響について実験を行った結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験には電池性能、圧力損失、温度などのデータ収集が可能な燃料電池評価装置を用いた。ガス供給系の加湿器内部は一定温度に加熱された水が満たされており、アノードガス(燃料ガス)およびカソードガス(酸化剤)はこの中をバブリングされ加湿される構造となっている。電流は電子負荷装置と定電圧電源を直列に接続した電気負荷制御系により、開放電圧から 100 A まで、1 mA の精度で電流を一定に制御できる。

実験に使用したセルは、図 1 に示すような反応面積 25 cm² のセル(Cell I)と、図 2 に示す 130 cm² のセル(Cell II)の 2 種類である。図 1 の黒い帯状のものはガスシールであり、その内側にある小さな穴がガス導入、排出口となっている。周囲の 8 箇所の丸穴はボ

Fig. 2 Details of 130 cm² separator of Cell II

Fig. 3 Relationship between pressure loss and groove depth based on Eq. (1)

ルト締結用の穴である。溝部については、両セパレータとも溝幅が 1 mm であり、溝深さは 25 cm² セパレータが 0.5 mm、130 cm² セパレータについては 0.3 mm と 0.5 mm の 2 種類とした。厚さはいずれも 0.8 mm である。

3. 実験結果および考察

3・1 流路深さ影響 セパレータが薄くなるとチャネル溝深さが浅くなり、圧力損失が増加するため、最適な流路の溝深さを求める必要がある。そこで圧力損失と溝深さの関係を求めるために、層流域における長方形管内の圧力損失の式を用いて評価した。

$$\Delta p = k \frac{64}{Re} \frac{l}{d_e} \frac{\rho u_m^2}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで Δp は圧力降下、 ρ は流体の密度、 l は流路長さ、 d_e は等価直径、 u_m は平均速度、 Re は等価直径を代表長さとした作動ガスのレイノルズ数である。また k は対象となる流路が偏平なマイクロチャネルであることによる修正係数であり、溝深さ 0.5 mm における値が実験値と一致するように決定した。

図 3 に溝幅を 1 mm、長さを 200 mm の一定とし、

溝深さを変えたときの計算結果を示す。また、図3中の○印は実際にドライ状態のガスをCell IIに流したときの実測値であり、GDL厚さは0.3 mmとなっている。なお今回の実験は定置式を主として想定しており、図3における空気流量は電流密度 0.5 A/cm^2 で空気利用率が40%におけるカソード流量相当とし、溝深さ0.5 mmのときの平均流速 u_m が 0.48 m/s となっている。圧力損失は溝深さを小さくすると急激に増大しており、特に0.2 mm以下で顕著に増加することがわかる。流量が一定の場合、流速は溝深さに反比例し、薄形流路の等価直径はおおむね溝深さに比例することから、式(1)によると溝深さの三乗に反比例して圧力損失が増大することになる。ただし、実際にはGDLがあるために上記の解析よりも溝深さの影響は少なくなるものと思われる。一方、燃料電池の場合、溝幅を変えても流路本数が変化するので実質的な流路断面積は大きく変化しない。また、流路長さは式(1)から明らかなように圧力損失に対して比例の関係にあり、流量についても同様である。これに対して溝深さは約三乗で圧力損失に影響するため、その設定は重要であり、拡散層(GDL)の変形等を考慮すると、上記の結果からおおむね0.3 mm程度が限界と考えられる。ただし、実際にはGDL内にも気体の流動があるため、この値が一般的な限界を示すものかどうか、さらに検討が必要である。

次に、流路溝深さが0.3 mmと0.5 mmの2種類のセパレータを用いて、フラidding等に対する電池性能の比較を行った。使用した部材は、市販の0.3 mm厚さのカーボンペーパーGDL、およびMEA(ナフィオン系膜にPt系電極触媒がホットプレスされたもの)を用いた。スタックの締付け圧力は、ボルト内部にストレインゲージを埋め込み、その張力を測定し、面圧に換算している。今回の試験面圧は0.88 MPaとした。セパレータの溝表面には、テフロン系溶剤をコーティングしたはっ水処理を施しており、その接触角は 123.8° であった。なお、接触角の測定は、直径約0.5 mm程度の水滴を数滴滴下して、そのなかから5個の水滴の平均を用いて行った。

Cell IIを用いて行った発電試験結果を図4および図5に示す。各試験は、燃料ガスに純水素、酸化剤ガスに空気を使用して、それぞれの利用率を70%および45%として試験を行った。燃料電池端板で計測したセル運転温度は 78°C とし、ガスの流れの方向は並行流である。いずれも電流密度は 0.4 A/cm^2 となっている。図4は溝深さが0.3 mmに対するものであり、図5は0.5 mmの場合について同様な比較を行った結果であ

Fig. 4 Experimental result of the 0.3 mm depth separator at 0.4 A/cm^2 in high humidity condition (high RH hereafter)

Fig. 5 Experimental result of the 0.5 mm depth separator at 0.4 A/cm^2 for high RH condition in Cell II

る。

まず圧力損失を見ると、溝深さが0.3 mmの場合は0.5 mmの場合に比べて3~4倍程度となっており、上記で検討したようにおよそ溝深さの三乗より若干低めの関係となっている。一方、電圧はいずれも0.65 V程度となっているが、明らかに0.5 mm溝深さのセルでは電圧変動が大きくなっている。この変動は低加湿条件よりも高加湿条件のほうが大きくなっており、フラiddingによるものと推定された。流路深さが深い場合には、ガスの流速が遅くなり、流路内の凝縮水の排出がむしろ間欠的になるため、電圧が変動したものと考えられる。なお、別途行っている可視化セル(ストレート流路)を用いた観察では、流路中の凝縮水の一部が排出されると同時に電圧の上昇が認められた。

図6は同様な実験を種々の加湿条件について行い、電圧および圧力変動の平均値ならびに最大値と最小値をまとめて示したものである。ただし、電圧変動幅に

Fig.6 Effects of channel depth on cell voltage and pressure loss in Cell II: the fluctuation bar is doubled for ΔE in all the figures in this paper

についてはスケールを2倍に拡大してある。図6より、溝深さによる電圧値の差異はほとんどないが、電圧変動は溝深さが深い場合のほうが若干大きいことがわかる。これは低電流密度域のような供給ガス量が少ない領域では、流速を確保するために断面積はある程度小さくしなければならず、今回の流路形状では0.3mmのほうが0.5mmよりも適切であったためと推定される。したがって、溝深さを0.3mm程度まで浅くしても電池性能上問題となることはなく、むしろ向上する可能性があるといえる。

以上、0.3mm溝深さで良好な性能確保の可能性を得たので、以降の実験は0.3mm溝深さのセパレータを用いて試験を進めることとした。

3・2 GDLはっ水処理量影響 はっ水処理度合いの異なるGDL(ガス拡散層)を用意して、運転に大きく影響するガス加湿量を変化させ、はっ水性能の違いによる性能評価を行った。

供試したベースGDLは市販のカーボンペーパー拡散層であり、テフロン系溶液の含浸量の違いにより異なるはっ水性をもたせるようにメーカーにて調整されたものを3種類用意した。そのはっ水性の違いについて水滴の接触角を調べた結果を表1に示す。接触角の試験は、直径約0.5mm程度の水滴を数滴滴下して、その中から5個の水滴の平均接触角を計測した。表1の中のタイプBが、ベースとした市販品である。表1に示すようにタイプAは、市販品に比べて接触角が小さ

Table 1 Comparison of contact angles

Type of GDL	Mean contact angle[deg]
A (Low WaterRep.)	145.5
B (Commercial)	152.6
C (Higher WaterRep.)	153.0

Table 2 Comparison of internal resistances for GDL's

Cell	Pressure [MPa]	A	B	C
I	0.17	100 mΩ	129mΩ	521 mΩ
	0.53	85.4 mΩ	122mΩ	252 mΩ
	0.88	82.9 mΩ	117mΩ	132mΩ
II	0.17	42.1 mΩ	43.3mΩ	46.5 mΩ
	0.53	35.4 mΩ	35.6mΩ	37.0 mΩ
	0.88	34.5 mΩ	34.9mΩ	35.4mΩ

く、一方、タイプCは市販品に比べてわずかに接触角が大きくなっている。なお、BとCの接触角の差はわずかであるが、テフロン系溶液の含浸量は、次に示す電気伝導度の差異からわかるように、明確に異なっている。

Cell IおよびCell IIのそれぞれにおいて、運転前の締付け圧力に対する内部抵抗値の測定結果を表2に示す。内部抵抗値は、発電可能な状態に組み付けられた構成で、運転前のドライ状態で集電板間の抵抗値をインピーダンスメータで計測した値である。いずれの場合も測定時の室温は20.5℃、湿度は35.7%であった。締付け圧力を高くするほど抵抗値は減少し、または水処理量が多くなる、タイプA、B、Cの順で抵抗値が大きくなっていることがわかる。これははっ水処理剤の含浸量が多いほど、GDL内のカーボン繊維間の接触抵抗が増大することによるものである。

次にこの3種類のGDLを用いて発電性能比較を行った。使用したMEAはゴアテックス社製の市販品を用いた。試験での締付け圧力は、0.88MPaである。試験はサイズやセパレータ流路形状の異なる2種類のセルを用いて行った。3・1節で用いたCell IIでは、先と同様に純水素と空気を使用し、それぞれの利用率を70%および45%とした。セル温度および低加湿条件や高加湿条件におけるガス温度などの試験条件は、先の溝深さ影響試験とまったく同一である。一方、反応面積25cm²のCell Iに対する試験条件は、セル運転温度が78℃、低加湿条件のガス温度はアノード65℃、カソード60℃とし、高加湿条件ではアノード72℃、カソード68℃となっている。さらに、使用ガスには純水素および純酸素を用い、並行流となっている。

Fig. 7 Effects of water repellency of GDL on the cell voltage and pressure loss at 0.4 A/cm²

図7には水処理量の違う GDL を用い、ガス加湿量を変えて性能評価を行った試験結果を示す。ただし、Cell I では実験の都合上、圧力損失を測定しておらず、セル電圧のみを示した。全体的に Cell I のほうが Cell II よりも電圧が高めとなっているが、これは純酸素をカソードガスに用いているためである。後述の表3から推定されるように、Cell II スタックの高加湿条件ではフラidding状態となっており、はっ水処理量が大きくなるタイプ A, B, C の順で電圧が低下し、さらにその変動が大きくなっている。Cell I の高加湿条件においても同様な傾向が見られる。ただし、純酸素を用いているためにその差異は小さめとなっている。一方、Cell II スタックの低加湿条件では表3から推定されるようにドライアウト状態に近く、そのためにはっ水性の低いタイプ A が他よりも若干電圧が高めとなったものと考えられる。

同様に、電流密度を 1.0 A/cm² とした条件で、はっ水性の異なる GDL の性能比較を行った結果を図8に示す。実験は Cell I に対するものであり、GDL は2種類について比較を行った。タイプ B の GDL で高加湿条件のものは圧力損失が大きく、また電圧変動もわずかに大きくなっており、フラiddingが生じ始めているものと推定される。これに対して、はっ水性の低いタイプ A で低加湿にした場合には、わずかなではあるが電圧が最も高くなっている。これは生成水が多いのでその分低加湿とするのがよく、少ない加湿水分

Fig. 8 Effects of water repellency of GDL on the cell voltage and pressure loss at 1.0 A/cm² in Cell I

で保水性のある低はっ水性のものが有利となったためと思われる。また、フラidding時の電圧変動は MEA と GDL の界面における凝縮水によるものであり、はっ水処理量が多いほうが間欠的にこの界面から流路に凝縮水が排出されるのに対して、はっ水処理量が少ない場合には準定常的に凝縮水が排出される傾向があるものと推測される。なお、低加湿条件でタイプ B の GDL を用いた場合に最も電圧が低くなっているが、これははっ水性が高いことによってドライアウトがわずかに生じたことが一因と推察される。

次に Cell II を用いて、電流密度を 0.8 A/cm² とした条件ではっ水性の異なる GDL の性能比較を行った結果を図9に示す。明らかに低加湿条件の電圧値が低くなっているが、これは後述する表3から明らかのように、強いドライアウト条件になっているためと考えられる。一方、高加湿条件では上記の 0.4 A/cm² の結果と同様にはっ水性の低いタイプ A の GDL を用いた場合に、高い電圧値となっている。

以上より、本実験で用いたような 0.3 mm の浅溝セパレータでは通常よりも低はっ水性とするほうが幅広い電流密度条件において良好な性能になるといえる。これはセパレータ溝深さが浅い場合には GDL 内を流動する気体の流量および流速が溝深さが深い場合に比べて相対的に増加し、低めのはっ水性でも良好に凝縮水が排出されるほか、MEA 界面が適度な水分状態に保湿されるのに対して、はっ水性が高い場合には MEA と GDL 界面の排水圧がむしろ増加することな

Fig. 9 Effects of water repellency of GDL on the cell voltage and pressure loss at 0.8 A/cm² in Cell II

Fig. 10 Effects of GDL thickness on cell voltage and pressure loss at 0.4 A/cm² in Cell II

によるものと推定される。ただし、この点についてはより詳細な解析が必要である。

3・3 GDL厚さの影響 次に厚さの違う GDL を用意して、発電性能への影響を評価した。用いた GDL は、0.2, 0.3, 0.4 mm の 3 種類の厚さである。なお、はっ水処理量ならびに空けき率はいずれも同一である。締付け圧力は 0.2, 0.3 mm GDL については、0.88 MPa であるが、0.4 mm GDL においては、0.88 MPa においてガスリークが発生したため、1.0 MPa の締付け圧力にて試験を行った。

図 10 はその結果であり、低加湿条件では GDL 厚さによる差異はわずかであるが、高加湿条件では厚さの薄いものほど電圧が高く、変動も小さくなっている。これは後述する表 3 から推定し、高加湿条件のほうがこの電流密度条件では適切な水分量となっており、この場合カソード下流では多少フラッシング気味となるので、差圧ならびに気体流速が大きく、排水性の容易な薄手の GDL が、より好ましい結果となったものと思われる。

3・4 凝縮水量の概算法と制御利用 ドライアウトやフラッシングは供給ガスの加湿条件のみならずセル温度の影響を大きく受ける。そこで、セル内部の凝縮水量を概算し、実験結果との対比を試みた。図 11 はセル内部の水分質量流量を示したものであり、 $\dot{m}_{ai}$ はアノード入口の加湿水分量、 $\dot{m}_{ci}$ はカソード入口の加湿水分量、 $\dot{m}_p$ は生成水量、 $\dot{m}_{cv}$ はカソード排気中に含まれる水蒸気量、 $\dot{m}_{av}$ はアノード排気中の水蒸気量である。この場合、 $\dot{m}_{av}$ および $\dot{m}_{cv}$ はそれぞれ

Fig. 11 Schematic of water mass flow

「各出口の気体はセル温度での飽和蒸気圧をもつ」と仮定し、出口水素または空気流量から計算により求めた。また、 $\dot{m}_{ai}$ および $\dot{m}_{ci}$ はそれぞれアノードおよびカソードから排出される凝縮水であり、いずれも単位は g/min である。プロトンの移動に伴う同伴水や逆拡散による水分移動は考えず、反応生成水はすべてカソードに移動するものと仮定すると、水のバランス式は下記のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{ai} &= \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{av} \\
 \dot{m}_{ci} &= \dot{m}_{ci} + \dot{m}_p - \dot{m}_{cv} \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

この値がマイナスの場合には、出口が飽和状態とならないことを示しており、その絶対値がマイナス側に大きい場合はドライアウトが生じやすく、プラス側に大きい場合には凝縮水が多量に排出される条件であることになる。実際にはプロトンの同伴水や逆拡散水があるので、 $\dot{m}_{ai}$ および $\dot{m}_{ci}$ の一部はどちらかに移動していることになるが、その総量が全体の凝縮水量を表しており、セル状態を推定する手がかりとなる。

本研究で行った各種条件に対する計算結果を表 3 に示す。Cell I の 1.0 A/cm² の条件ではアノードおよびカソードを合わせた全凝縮水量は顕著に多く、高いフ

Table 3 Components of water mass-balance ($\times 10^{-2}$ g/min)

Cell	Condition	J (A/cm ²)	$\dot{m}_{ai}$	$\dot{m}_{ci}$	$\dot{m}_p$	$\dot{m}_{av}$	$\dot{m}_{cv}$	$\dot{m}_{al}$	$\dot{m}_{cl}$
I	Low RH	0.4	2.09	1.69	2.45	1.05	1.93	1.04	2.21
		1	3.69	2.98	4.34	1.86	3.21	1.83	4.11
	High RH	0.4	2.77	2.36	2.45	1.05	1.93	1.72	2.88
		1	4.91	4.18	4.34	1.86	3.21	3.05	5.31
II	Low RH	0.4	6.75	19.9	9.81	4.20	46.7	2.55	-17.0
		0.8	13.4	39.8	19.5	8.37	93.3	5.03	-34.0
	High RH	0.4	12.5	37.8	9.81	4.20	46.7	8.29	0.91
		0.8	24.9	75.3	19.5	8.37	93.3	16.5	1.50

ラッディング条件となっていることがわかる。一方、Cell II の低加湿条件では明らかにドライな条件となっている。図 6 や図 7, 9 における圧力や電圧の差異は、表 3 に示された内部凝縮水量の推定値から前述したように種々解釈することができ、運転状態を推定する有用な指標になるものと考えられる。特にセル温度は排気飽和水蒸気量に大きく影響するために、セル温度によってドライアウトやフラッディング状態が顕著に変化する。実際の運転において、セル温度をモニタしながら入口の加湿条件を制御するなど、水分管理制御に応用可能と考えられる。

4. 結 論

コンパクトで低コストな燃料電池開発の一つとして、流路深さ 0.3 mm で厚さ 0.8 mm の薄形セパレータを組み込んだ固体高分子形燃料電池を試作し、発電性能に対する流路深さ、GDL のはっ水性および厚さ、作動ガスの湿度ならびに温度影響等について実験を行った。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) セパレータの流路溝深さについて検討を行った結果、圧力損失は溝深さのおおむね三乗に反比例して増大し、今回解析した電流密度が 0.5 A/cm^2 のストレート流路においては、溝深さが 0.2 mm 以下になると圧力損失は急激に増加するものと推定された。この関係は管路内流れを仮定する限り、気体の流速や流路形状によらないものと考えられるが、実際には GDL 内の流れが加わるため、さらに検討が必要である。なお、本実験では GDL や MEA の変形を考慮し、最小 0.3 mm 深さとした。

(2) はっ水処理量を高めると GDL の内部抵抗が増加するほか、ドライアウトしやすくなるので、高電流密度条件を除いてはっ水性を高くし過ぎるのは好ましくない。一方、フラッディングが生じるような高電

流密度域でははっ水性が高いほうが良好な性能を示す場合が多いが、流路内の凝縮水の間欠的な排出影響を受け、低はっ水性 GDL に比べて電圧がより大きく変動しやすい。特に溝深さが浅い場合には、差圧ならびに流速が大きく、凝縮水が良好に排出される一方で圧力変動の影響を強く受けるので、はっ水性は多少低めとするのがよい。

(3) GDL の厚さは発電性能に大きく影響し、特に浅溝の薄形セパレータを用いた場合には流路深さに対する相対比率が大きくなるので、フラッディングしやすい高加湿条件で GDL 厚さによる差違が顕著となる。厚い GDL は排水性に乏しく、フラッディングを起こしやすい状態においては不利となる。

(4) 今回提案したような簡単な凝縮水量見積もり法は、フラッディング状態の推定と運転中の加湿条件設定を行ううえで、おおよその指標となり得る。

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の助成を得て実施された。また、IHI シバウラの三上貴士君に実験協力をいただいたほか、E & E 研究所の菱沼教授からご助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Sekigutci, A., About the Policy Which is Directed to the Utilization of the Fuel Cell, *The Journal of Fuel Cell Technology*, Vol. 3, No. 4 (2004), pp. 4-7.
- (2) Onda, K. et al., Measurement of Physical Properties of Membrane and Analysis of Current Density Distribution at a Polymer Electrolyte Fuel Cell, *Transactions of Journal of the Institute of Electrical Engineers of the Japan, Series B*, Vol. 125, No. 5 (2005), pp. 530-536.
- (3) Yoshikawa, H. et al., Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell for Automotive Applications (1), *Transactions of Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 66, No. 652 (2000), pp. 3218-3225.
- (4) Yoshikawa, H. et al., Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell for Automotive Applications (2), *Transactions of Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 653 (2001), pp. 197-202.
- (5) Okazaki, K. et al., Effects of Gas Flow Directions on Electrical Performance and Temperature of PEFC, *Transactions of Journal of the Japan Heat Transfer Symposium*, Vol. 38, No. 3 (2001), pp. 879-880.
- (6) Hirai, S. et al., Microscopic Observation of State and Behavior of Water in a Gas Diffusion Layer of PEFC, *Transactions of Journal of the Japan Heat Transfer Symposium*, Vol. 43 (2006), pp. B 221.
- (7) Konomi, T. and Nakamura, G., Study of Water Production Behavior by the visualization of PEFC, *Transactions of Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 72, No. 715 (2006), pp. 745-751.
- (8) Tüber, K. et al., Visualization of Water Buildup in the

- Cathode of a Transparent PEM Fuel Cell, *J. Power Sources*, Vol. 124 (2003), pp. 403-414.
- (9) Yang, X. G. et al., Visualization of Liquid Water Transport in a PEFC, *Electrochem. Solid-State Letters*, Vol. 7, No. 11 (2004), A 408-A 411.
- (10) Takagi, Y. et al., Thinning of Polymer Electrolyte Fuel Cell and Flow in the Separator, *Transactions of Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 69, No. 679 (2003), pp. 197-202.
-