ディスク型 SOFC 流路内の放射状ガス流動に関する流体力学的検討

Fluid dynamic study on radial gas flow behavior in a disk shape planar SOFC channel

○ 学 向井 良卓 (芝浦工大院) 正 角田 和巳 (芝浦工大)
佐藤 和真 (グローリー工業) 佐々木 基泰 (芝浦工大)

Yoshitaka MUKAI, Shibaura Institute of Technology, Toyosu 3-7-5, Koutou-ku 135-8548
Kazumi TSUNODA, Shibaura Institute of Technology
Kazuma SATO, GLORY LTD
Motoyasu SASAKI, Shibaura Institute of Technology

Radial flow phenomena in a disk-shape channel which simulate a disk-shape planar-type Solid Oxide Fuel Cell(SOFC) was investigated experimentally and numerically under the same condition. In the planar-type SOFC, a reduction of thermal stress is one of the important issues. A temperature distribution in the planar-type SOFC is strongly affected by the gas flow behavior, and hence we tried to clarify flow pattern at various mass flow rate by using Particle Image Velocimetry(PIV). In the present study, it was found that a uniform flow distribution in the fuel channel was attained in the case of the Reynolds number of about 7. On the other hand, non-uniform flow distribution was enlarged with increase of flow rate in the air channel. Results of numerical simulation were in close agreement with experimental measurements. These results suggest the necessity of improvement of the channel shape.

Key Words: Fuel Cell, Radial Flow, Flow Visualization, Particle Image Velocimetry

1. 緒言

固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell:SOFC) は構成材料がすべて固体であるため形状に自由度があり, 円筒型, 平板型, ハニカム型が考案されている⁽¹⁾. 中でも平板型は高い出力密度を得ることができるが, 一方では, 動作温度が高いために熱応力が生じやすいという欠点を持つ. したがって, 熱応力を緩和するためにも, 均一なガス流動が形成される運転条件や流路形状について, 流体力学的な観点から検討することが必要である. しかし, SOFC 内は電気化学反応を伴う高温の流れ場

となるため, 実験的研究が困難であり, 数値解析による研究が主体的に行われてきた⁽²⁾.

そこで本研究では平板型の一つで軸対称性を有するディスク型 SOFC セルについて, 相似則を利用して実際のセル内の流れ場を模擬し, 粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry:PIV) を用いてディスク型流路内の流動特性を実験的に調べた. また, 実験と同一条件で数値解析を行い, 相互を比較することで, ディスク型 SOFC 流路内で生じるガス流動の流体力学的特性を検討した.

2. 実験装置および方法

2.1 流路形状 本研究で扱うディスク型流路は図 1 に示すようなものであり, 外径 90mm, 内径 24mm の中空円板に, 集電板を模擬した厚さ 2mm の平板が, 半径方向に沿って 90° 間隔で計 8 枚配置されている. 下側 2 枚の円板で構成される流路は, 燃料流路を模擬したもので, 円板中心から流入したガスは, 集電板によって 4 分割された流路を外縁に向かって流れていく. 上側 3 枚の円板で構成される流路は空気流路を模擬しており, 外縁円筒面に設けた 4 つの流入孔から吹き込まれたガスは, 中心で向きを反転した後, 集電板によって 4 分割された下段流路を外縁に向かって流れる. なお流路高さは, 燃料側を 5mm, 空気側を 2mm に設定している. 座標系は円筒座標系として燃料流路底面の中心を原点にとり, r 軸を外周へ向かう方向を正, θ を空気流入孔が設けられている位置を 0° として時計回りを正, z 軸を燃料流路上面方向を正としてそれぞれ定義する.

2.2 実験方法 アクリルで製作した図 1 の流路を, 図 2 の測定系に組み込み, PIV を用いて燃料流路, 空気流路における水平断面および垂直断面の流れ場を計測した. 作動気体には空気を扱い, マスフローコントローラーにて流量を調整した空気に微粒子を混ぜた後, 流路に流入させた. ダブルパルス Nd:YAG レーザー (波長 532nm, 400mJ/pulse) をシリンドリカルレンズを

Fig. 1: Shape of disk channel

介してシート光に変換し、測定断面に照射することによって可視化された流れ場を白黒 CCD カメラ (TSI 社, Model630046) で撮影し、2 枚の連続した画像 50 組から平均速度ベクトルを求めた。なお、画像解析には La Vision 社の DaVis Flow Master Version7.0 を使用した。本研究では、実際の SOFC 運転条件に基づいてレイノルズ数 Re を求め、相似則に従って実験条件を設定した。発電時の電流密度、燃料利用率等の条件を考慮して SOFC 内の各流入口でのレイノルズ数を求めると、燃料流入口では $Re=5\sim35$ 、空気流入口では $Re=14\sim93$ となる。したがって、これらのレイノルズ数の範囲が含まれるように、実験における燃料流路内の流量を $Q_f=0.1\sim3\text{L/min}$ 、空気流路内の流量を $Q_a=1\sim8\text{L/min}$ の範囲に設定して実験を行った。

2.3 解析方法 本研究では、実験で用いた流路を対象として数値解析を行った。ただし、本解析は予測されるガス流動についてのみ調べることが目的であり、酸化還元反応を含む電気化学的解析は考慮していない。したがって、作動ガスは非圧縮性と仮定し、以下に示す連続の式、運動方程式を有限体積法によって離散化し、定常解を求めた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

非圧縮性の仮定から連続の式 (1) は非定常項が含まれないため、速度と圧力の解法には SIMPLEC 法を適用した。対流項の離散化には二次精度 MUSCLE スキームを適用した。解析には汎用コードの SC/Tetra を使用し、得られた解析結果は Tecplot Version10 を使い可視化を行った。なお、解析は流路形状の対称性から円板を 4 分割した解析モデルとし、その領域を四面体を

Fig.2: Experimental apparatus

Fig.4: Velocity distributions along the azimuthal direction in fuel channel

基本とした約 60 万の非構造格子で要素分割した。

3. 結果および考察

3.1 燃料流路 図 3 に、燃料極近傍 ($z=4.5\text{mm}$) に相当する水平断面内の速度分布を示す (左: 実験結果, 右: 解析結果)。2 種類の異なる流量 $Q_f=0.53\text{L/min}$, 1.58L/min について比較しているため、速度を燃料流入口の平均流速 U_{f0} で無次元化している。実験結果、解析結果ともに流れが放射状に広がりながら、拡大流路の影響で徐々に減速されていくことがわかる。中心から流入してきた空気は集電板を避けるようにして流れ、集電板近傍で流速の低下も見られるが、どの流量においても流れが集電板からはく離することはない。また実験結果では、流量の増加とともに、流速の低下する領域が集電板から離れた位置にまで及ぶようになるが、解析結果には実験結果ほど顕著な違いは現われていない。

図 4 に、円周方向に沿った速度分布を示す。 $Q_f=0.53\text{L/min}$ の場合、実験で得られた速度分布は $\theta=\pm 20^\circ$ 付近が若干突出した形をしているが、解析結果の分布は、両側の境界層を除くとほぼ一様になっている。また、 $Q_f=1.58\text{L/min}$ になると、入口に近い $r=20\text{mm}$, 25mm では、実験結果の円周方向の流速変動が増加するだけでなく解析結果の変動も増加することが確認できる。しかし、下流域の $r=35\text{mm}$ では、解析結果の速度

Fig.3: Velocity vector and contour map in a horizontal cross section of fuel channel (left side:Experiment, right side:Simulation)

分布は $Q_f=0.53\text{L/min}$ の場合と同様に様となっている。

図5は、 $\theta=0^\circ$ の流路垂直断面における速度分布を、 $Q_f=0.53\text{L/min}$ の場合について示したものである（上：実験結果、下：解析結果）。流路とレーザーシート的位置関係のため、中心付近の流れ場の画像が十分に取得できず、したがって実験結果には、 $r=12\text{mm}$ より下流の速度分布のみ表示している。実験、解析とも下流に向けて流れが減速されており、上下の円板壁面に沿って境界層の発達している状況が捉えられている。また、下側円板の中心から流入した流れは鉛直上方に慣性を持つため、上側の円板寄りに偏向した状態で円板間へ流れ込むが、その際、流れに対して流路の有効断面積が狭まるため、円板間入口で速度が増加し、上側円板寄りにピークを持つ速度分布となっている。

以上のことから燃料流路における実験と解析の流れ場はほぼ同じ傾向を示しており、燃料流路における数値解析の妥当性が評価できる。また、燃料流路では、流量の増加とともに集電板近くで流れが減速されやすくなり、一様な放射状流れを実現できる領域が制限されるようになる。このことで燃料供給の偏りが生じるのは望ましくないため、本実験条件下では、流量 $Q_f=0.53\text{L/min}$ 程度すなわち $Re=7$ 程度が燃料流路における最適な流動条件と考えられる。

3.2 空気流路

3.2.1 上段流路 図6に、空気流路上段の水平断面（流路高さ中心）における速度分布を示す。ここでも、異なる流量 $Q_a=1.52\text{L/min}$ 、 2.87L/min 、 3.54L/min について比較を行うため、流速値は空気流路流入部の平均流速 U_{a0} で無次元表示している。なお、PIV 計測の際、流入部がレーザーシートを遮へいするため、 $1/8$ 水平面しか計測できないが、ここでは解析結果との比較を容易にするため、実験結果には右半分の速度ベクトルを左側に反転したものも描画している。流路入口から噴流状態で流入した空気は、折り返し部の円筒面付近で空気流路下段へ向かう流れと外縁方向へ反転する流れとに分けられていることが確認できる。このとき、流量 Q_a が低い場合ほど反転してくる流れの

Fig.5: Velocity vector and contour map in a vertical cross section of fuel channel ($Q_f=0.53\text{L/min}$, $\theta=0^\circ$)

量は少なくなっているが、これは、低流量では円筒面に到達したときの噴流幅が広がっており、流体が保有している運動量も少ないためである。しかし、流量が増加し噴流の持つ運動量が増加すると、円筒面に対して局所的に強い流れが衝突するようになり、反転した流れが渦を形成する。このような流れの挙動は、後述のように、空気流路下段の流れに対しても影響を及ぼすようになる。

実際の SOFC では空気は反応ガスとしてだけでなくセル自体の冷却効果も兼ねているため、セル内温度と比べ流入温度は低い。そのため、噴流のような流入方法は温度不均一を引き起こし、熱応力の増加を導くことになる。これは耐久性の観点から見て望ましいものではなく、流入形状の改良が必要であろう。

3.2.2 下段流路 先述の図6と対比させて、空気流路下段の水平断面内速度分布を示したものが図7である（左：実験結果、右：解析結果）。実験結果、解析結果ともに $Q_a=1.52\text{L/min}$ では周方向に一様な分布を示しているが、 $Q_a=2.87\text{L/min}$ になると $\theta=0^\circ$ に関して対称なピークを持つ流速分布へと変化し始める。 $Q_a=3.54\text{L/min}$ になるとその不均一性がより顕著になり、その領域も下流方向へ伸びる。本報告には記載していないが、流量 Q_a を増やすと高流速の領域がさらに下流方向へ拡大する。これらの流動特性は先述の空気流路上段における流れと関連している。 $Q_a=1.52\text{L/min}$ では上段の折返し部分全体に偏りなく空気が流れ込むため、下段で周方向に一様な流れ場を形成することができる。しかし、 $Q_a=2.87\text{L/min}$ になると、上段において噴流が円筒面に衝突した後、流れが2つに分断され、下段流路の2箇所に高流速領域が発生する。さらに、 $Q_a=3.54\text{L/min}$ になると噴流の運動量も増え、その傾向も強くなる。実験、数

Fig.6: Velocity vector and contour map in a horizontal cross section of upper air channel (left side:Experiment, right side:Simulation)

Fig.7: Velocity vector and contour map in a horizontal cross section of lower air channel (left side:Experiment, right side:Simulation)

値解析ともに上記のような挙動を示したが高流速領域の生じる位置には違いが見られる。詳細な比較のため、各流量における実験と数値解析の円周方向に沿った速度分布の比較を図8に示す。実験では $\theta = \pm 20^\circ$ 付近に高流速領域が現れるが、解析結果ではこれよりも集電板に近い $\theta = \pm 38^\circ$ 付近に高流速領域が生じている。これは、空気流路上段から下段へ向かう際の反転部の流れに違いがあるためで、実験では噴流が円筒面にぶつかり下段流路へ折り返す際、解析よりも円筒面によって分断される流れの影響が大きいことによる。そのため、解析結果では下流に向かう流れが集電板に沿って流れるようになるが、実験では噴流状の流れが維持されたまま下段に進むため、高流速場が $\theta = \pm 20^\circ$ に生じたと考えられる。

以上のように、速度分布にピークの生じる位置の違いなどの差異はあるが、実験結果と数値解析は類似した流動傾向を示している。また、空気流路下段では、低流量において均質な流れ場を形成できるが、高流量になるにつれて円周方向に偏りが生じる。しかし、冷却効果が重要となる空気流路では高流量でも均質な流れを実現する必要があり、流路形状、集電板の形状と配置等については流量の変化に伴う流れの挙動も考慮して設計することが重要となる。

4. 結言

ディスク型 SOFC セルを模擬した流路内の流動特性を調査するため、PIV を用いた実験と数値解析を行い、両者を比較、検討することで以下の知見を得た。

Fig.8: Velocity distributions along the azimuthal direction in lower air channel

- (1) 本研究のモデルにおける実験結果と数値解析結果は類似した流動特性を示し、双方の妥当性を評価できた。これにより、形状変更の際の流れ場の事前予測として、本解析を利用することが可能であると考えられる。
- (2) 本実験条件下では燃料流路内の流れのレイノルズ数が7程度のとき、最も一様な流れ場が形成される。
- (3) 空気流路において、必要とされる空気流量範囲内の低流量では、均質な流れ場を形成することが可能であるが、高流量になるにつれて円周方向に流速の偏りが生じる。

参考文献

- (1) 田川 博章, 固体酸化物燃料電池と地球環境, アグネ承風社, 1998
- (2) Zheng DANG, Hiroshi IWAI, Kenjiro SUZUKI, NUMERICAL MODELING OF A DISK SHAPE PLANAR SOFC, Second International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, 2004