20806 平板形 SOFC を模擬したディスク型流路における旋回流れの構造

Swirling Flow Structures in the Disk Shape Model Channel of a Planar SOFC

○学 神田 智史 (芝工大) 正 角田 和巳 (芝工大)

Tomohito KOUODA, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo
Kazumi TSUNODA, Shibaura Institute of Technology

We investigated the detailed flow structure between two-parallel disk shape plates to simulate a flow under practical solid oxide fuel cell (SOFC) operation, and tried to improve the flow uniformity by the optimization of flow passage. In the present study, particle image velocimetry (PIV) is used to provide a description of the velocity fields. In the case of applying circle involute shape current collectors, a flow uniformity was achieved over the wide range of Reynolds numbers. An estimation of a fluid motion in the channel was carried out by using Navier-Stokes equations. We confirmed that the velocity component in the flow direction is dominant and plays primary role to maintain a swirl motion.

Key Words: Particle Image Velocimetry, Swirling Flow, Solid Oxide Fuel Cell, Disk Shape Channel, Circle involute

1. 緒言

固体酸化物燃料電池 (SOFC) は高温域で作動するため、高価な触媒を使うことなく高い発電効率を達成することができ、熱機関との組み合わせによる総合効率の向上も期待されている。また、セルが固体で構成されているため、燃料流路や空気流路に多様な形状を適用できる点でも優れた特性を有している。なかでも、ディスク型流路を採用した平板形 SOFC では流動様式の選択が豊富であり、燃料や空気の流れを工夫することによって、セル内の温度分布や電流分布を最適化することができると考えられる。

そこで本研究では、ディスク型流路内の流動様式として旋回流れを採用し、ディスク型 SOFC を模擬した流路を用いてその有効性を検討した。さらに、PIV 計測で得られた速度場から運動方程式の各項を評価し、旋回流れの構造を運動量輸送に基づいて実験的に明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

ディスク型 SOFC は、円板形状の燃料流路と空気流路で電極・電解質を挟み込んだ構造をとることから、本研究では図 1 のようなアクリル製の試験流路を用いて実験を行った。以下では、燃料流路内の流れ場について報告する。燃料流路は、内径 24 mm、外径 90 mm の中空円板 2 枚を 2 mm 間隔で平行に積層することで構成されている。円板間には、集電体を模擬した厚さ 2 mm のインボリュート形状の板が 45° おきに 8 枚配置され、円板中央から流入した空気は、集電体によって分割された流路内を外縁に向かって流れていく。なお、座標系は図 1 に示すような直交曲線座標系を用いる。

実験に使用した作動流体は、デジタルマスフローコントローラ (堀場エステック製, SEC-V110, 120DM) によって一定流量に制御された空気に、公称平均粒子径 10 μm のトレーサ粒子群を混入したもので、これを図 1 の試験流路に供給し、図 2 に示すような PIV 装置を用いてディスクと平行な面内の瞬時速度場を計測した。本研究では、レイノルズ数 Re を実際の作動条件とあわせることで SOFC の運転条件を模擬している。発電時の電

Fig. 2: Experimental apparatus

流密度や空気の利用効率等の条件を考慮して燃料流路入り口の流速を求めると、レイノルズ数は $Re = 4 \sim 29$ となるので、この範囲にレイノルズ数が含まれるように流量を $Q_f = 0.1 \sim 3.0$ l/min に設定して実験を行った。また、上記のような低レイノルズ数流れが計測対象であり、本実験条件下では流れの非定常性による影響も少ないことから、以下では PIV によって計測された 50 枚 25 組の瞬時速度分布の平均値に基づいて流れ場を考察する。

3. 実験結果および考察

3.1 燃料流路の速度場

図 3 に、流路高さ中央における水平断面内の速度ベクトルと流速の等直線を示す。ここでは、流れ方向に対して右側の集電体壁を Pressure side、左側を Suction side と呼ぶことにする。これらは、2 種類の流量 ($Q_f = 0.3$ l/min, 2.0 l/min) のもとで得られた結果を比較したもので、それぞれ $Re = 4, 29$ に相当する流れとなっている。いずれの流量においても、隣り合う集電体に挟まれた領域内では、ほぼインボリュート曲線に沿って中心から外周に向かう流れが得られている。流入域付近では Suction side 側で流速が高くなる傾向が見られるが、下流に向けてほぼ一定の速度が維持されていることが確認できる。

Fig. 3: Mean velocity vector and contour map in fuel channel

3.2 運動方程式に基づく旋回流れの力学的機構

インボリュート型集電体の表面 (Suction side) に沿う座標軸を l , 集電体表面に対して垂直な座標軸を s で表すと、 $l-s$ 座標系における定常流れの Navier-Stokes 方程式は以下のように記述することができる⁽¹⁾。

$$\frac{R_c}{R_c + s} u \frac{\partial u}{\partial l} + v \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{uv}{R_c + s} = -\frac{R_c}{R_c + s} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} + F_{1-vis} \quad (1)$$

$$\frac{R_c}{R_c + s} u \frac{\partial v}{\partial l} + v \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{u^2}{R_c + s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + F_{2-vis} \quad (2)$$

Fig. 1: Experimental model of disk shape channel

上式において, u , v は l 方向および s 方向の速度成分, R_c は Suction side 側集電体表面の曲率半径, ρ は密度, p は圧力を表している. また, F_{1-vis} , F_{2-vis} は, 動粘度を ν としてそれぞれ次式で与えられる粘性項を表している.

$$F_{1-vis} = \nu \left[\frac{R_c^2}{(R_c + s)^2} \frac{\partial^2 u}{\partial l^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \frac{1}{R_c + s} \frac{\partial u}{\partial s} - \frac{u}{(R_c + s)^2} \right. \\ \left. + \frac{2R_c}{(R_c + s)^2} \frac{\partial v}{\partial l} - \frac{R_c}{(R_c + s)^3} \frac{dR_c}{dl} v + \frac{R_c s}{(R_c + s)^3} \frac{dR_c}{dl} \frac{\partial u}{\partial l} \right] \quad (3)$$

$$F_{2-vis} = \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial s^2} - \frac{2R_c}{(R_c + s)^2} \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{1}{R_c + s} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{R_c^2}{(R_c + s)^2} \frac{\partial^2 v}{\partial l^2} \right. \\ \left. - \frac{v}{(R_c + s)^2} + \frac{R_c}{(R_c + s)^3} \frac{dR_c}{dl} u + \frac{R_c s}{(R_c + s)^3} \frac{dR_c}{dl} \frac{\partial v}{\partial l} \right] \quad (4)$$

ここで, 旋回流れの挙動を詳細に調べるため, PIV 計測によって得られた速度場を用いて, 上式の各項が運動量の l 方向成分および s 方向成分の変化に及ぼす影響を評価した. ただし, 圧力場の測定は行っていないため, 圧力項を除く各項からの寄与に関してのみ検討した. なお, 以下では便宜上, (1) 式左辺の各項を順番に F_{1-1} , F_{1-2} , F_{1-3} , (2) 式についても同様に F_{2-1} , F_{2-2} , F_{2-3} と表記することにする.

図 4 は, l 方向に沿う (1) 式の各項の寄与を s 方向の異なる位置について比較したもので, 各項は流量から求めた平均速度 U と流路高さ H で無次元化されている. 図 4(a) から, $l/l_0 < 0.5$ において F_{1-1} は ± 0.2 の範囲で増減を繰り返しているが, $l/l_0 > 0.6$ では $F_{1-1} \approx 0$ となっている. これは, $l/l_0 > 0.6$ が等断面流路の下流に相当し, 流れ方向の速度 u が大きく低下しているためである. 図 4(b) からは, $l/l_0 = 0.2$ 付近と $l/l_0 = 0.5$ 前後を除いて, $F_{1-2} \approx 0$ となっていることがわかる. これらのうち, $l/l_0 = 0.2$ 付近では, Suction side に近い $s/s_0 = 0.17$ において F_{1-2} が 0.07 まで達しているが, この位置では最大速度領域を過ぎた流れが Pressure side 側に若干偏っているため, 流路方向の速度成分 v が増加して $v\partial u/\partial s$ の寄与が増えたと考えられる. また, $l/l_0 = 0.5$ 近くの挙動は, この位置が Pressure side 側の集電体後縁部に対応しているためであり, 集電体の外側に回り込もうとする s 方向の流れが発生し, v および $\partial u/\partial s$ が増えたことが影響している. 図 4(c) は (1) 式の左辺最終項の挙動であるが, l 方向への 1 次元性が維持されている領域では v の影響が小さく, $F_{1-3} \approx 0$ となる. なお, $l/l_0 = 0.5$ において F_{1-3} が 0.05 まで増加しているのは, 図 4(b) でも見たように, この位置で s 方向の速度成分 v が増加していることに起因する. 粘性項の寄与に関しては, 図 4(d) から明らかなように, 流路上流において F_{1-vis} が -0.05 に達しているが, 運動量輸送に対して粘性項が及ぼす影響は相対的に小さいことがわかる.

図 5 に, (2) 式における各項の寄与を示す. 図 5(a) を見ると, $l/l_0 < 0.5$ において F_{2-1} は負値をとっている. これは, 下流に向かうにつれて速度場の l 方向への 1 次元性が改善されているため, v が流れ方向に減少しており, その結果 $\partial v/\partial l < 0$ となることに対応している. 図 5(b) からは, $l/l_0 = 0.5$ 付近を除いて F_{2-2} はほぼ 0 となっていることがわかる. これは, 図 4(b), (c) と同様, 集電体の配置の関係で $l/l_0 = 0.5$ において流路形状が変化していることで, 流路幅方向への流れが生じて $\partial v/\partial s > 0$ となるためである. (2) 式左辺の最終項 F_{2-3} については, 図 5(c) から明らかな傾向が認められる. すなわち, F_{2-3} の大きさは, 下流方向に沿って減少すると同時に, Suction side から Pressure side へ向けて低下している. これは, インボリュート曲線の性質から l とともに曲率半径 R_c が増加することと, Suction side から Pressure side へ向けて s が増加することが原因である. F_{2-3} は, インボリュート曲線に沿う旋回流れを維持するための向心方向加速度に相当しており, u がほぼ一様な領域では, $R_c + s$ の影響を直接受けることになる. また, 図 5(d) から明らかなように, F_{2-vis} の変動は ± 0.03 の範囲内に収まっており, 運動量の s 方向成分に対しても, 粘性項の影響はわずかであることがわかる.

Fig. 4: Balance of each term of equation (1) for $Q_f = 0.3$ l/min

Fig. 5: Balance of each term of equation (2) for $Q_f = 0.3$ l/min

以上より, いずれの場合も粘性項の影響は弱く, (1) 式では F_{1-1} , (2) 式では F_{2-3} が支配的となることから,

$$u \frac{\partial u}{\partial l} \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l}, \quad \frac{u^2}{R_c + s} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} \quad (5)$$

の関係が成立していると考えられる. したがって, s 方向の速度成分 v は旋回流れにほとんど影響を及ぼしておらず, さらに $|F_{2-3}| > |F_{1-1}|$ の傾向が見られることから, l 方向の速度成分 u は, 主として旋回流れの実現に寄与しており, 流路幅方向の圧力こう配 $\partial p/\partial s$ を生じていることが確認できる.

4. 結言

ディスク型 SOFC の構造を模擬した試験流路を用いて, インボリュート形状の集電体が設置された燃料流路内の流れを PIV で計測し, 以下の知見を得た.

- [1] 燃料流路内にインボリュート形状の集電体を配置すると, 流量 (レイノルズ数) によらず下流までほぼ一定の速度場が維持される.
- [2] 速度場の計測結果から, Navier-Stokes 方程式の各項が運動量変化に及ぼす影響を評価した. 粘性項からの寄与は弱く, インボリュート曲線に沿う速度成分が卓越しており, これが旋回流れの実現に主要な役割を果たしていることを実験的に明らかにした.

文 献

- (1) Schlichting, H., Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, pp67-68, New York, 1979.