

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560210

研究課題名(和文) ディスク型SOFC高性能化のための平行円板流路内流れの熱流体制御

研究課題名(英文) Study on heat and fluid flow control between two parallel disk plates for high performance disk shape SOFC

研究代表者

角田 和巳 (Tsunoda, Kazumi)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：70255644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：固体酸化物形燃料電池(SOFC)は燃料電池の中で最も高い効率を実現でき、その形状も多様である。本研究は、平行円板によって構成されるディスク型SOFCを対象としたもので、円板間に生じる低レイノルズ数流れの熱流体特性を制御して速度分布の均一性を促進することにより、SOFCの高性能化を目指した。その結果、セルの構成要素である集電体の形状にインボリュート曲線を採用し、集電体間隔を従来より狭めて力学的に流れを抑制することで、流路の広い範囲でほぼ同じ流速を維持できることを実証した。また、伝熱実験によってヌセルト数の分布を調べ、伝熱特性の観点からも、インボリュート形状流路がSOFCに適していることを示した。

研究成果の概要(英文)：Among several types of fuel cells, a solid oxide fuel cell (SOFC) can provide the highest efficiency and have many kinds of cell geometries. In this study, we focused on a disk shape planar-type SOFC and proposed a technique effective for improvement of the disk shape SOFC performance through experiments by using model channels.

A non-uniform temperature distribution inside the SOFC causes large thermal stresses, which is one of the hurdles in commercializing SOFCs. To overcome this drawback, we designed a new channel with circle involute shape current collectors having a narrow gap between adjacent them. By using this channel, we demonstrated that a swirling flow was generated in the channel and its velocity distribution along the channel width direction was almost similar shape in the whole region of the channel. We also investigated characteristics of heat transfer in the present channel and found that this channel structure was suited to SOFC from Nusselt number distributions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体力学 固体酸化物形燃料電池 ディスク型SOFC 円板間流れ 旋回流れ レーザードップラー流速計 低レイノルズ数流れ 伝熱

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国において、電源・電力の安定供給を維持することは、最大の関心事の一つとなっている。この社会的要請に応えるためには、再生可能エネルギーの導入を進める一方で分散型発電システムの構築を加速し、エネルギー利用率を向上させる必要がある。

燃料電池はそのような分散発電の中核を担う技術の一つであり、高温領域で作動する固体酸化物形燃料電池(Solid oxide fuel cell; SOFC)と熱機関を組み合わせれば、数 MW 級の高効率分散型発電システムを実現することも可能である。しかし、SOFC と熱機関とのハイブリッドシステムによって高い総合効率を達成するためには、電力変換の過半を担う SOFC の長寿命化や性能向上が不可欠であり、高温下において問題となる熱応力を軽減し、圧力損失を抑制することが技術的な課題として挙げられている。

一方、SOFC はセルが固体で構成されているため、ガスの導入方法や集電体の形状・配置を工夫することによって、多様な流路形状を設計することが可能である。そこで本研究室では、流動様式の自由度が高いディスク形状の平板型 SOFC に着目し、熱応力の緩和に寄与するような流路形状の検討を進めてきた。その結果、インボリュート曲線に沿う旋回流れの導入により、流れ方向の速度分布が一様な状態に改善されることを実証したが、流入口付近では流れの偏向が観察され、圧力損失を抑制する観点からも、作動気体の流入方法について検討の余地があることが示唆された。

2. 研究の目的

本研究では上述の背景を踏まえ、SOFC 内の低レイノルズ数流れにおいて重要となる圧力特性を把握するとともに、流路内のより広範な領域において速度分布が一様となる流路形状を提案する。また、SOFC の運転時に発現する温度分布の特性、あるいは温度場が速度分布へ及ぼす影響等について未検討であることから、平行円板流路内に生じる温度場の特性を実験的に調べる。

3. 研究の方法

本研究では、ディスク型 SOFC を模擬したアクリル製平行円板流路を作製し、室温の圧縮空気を作動ガスとして実験を行った。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が、各流路における作動ガスの流体力学的挙動に関して本質的な違いはない。したがって本実験では、主として燃料流路内の流れを対象に各種の計測を行った。

図 1 は、ディスク型モデル流路の概略を示したものであり、上下の円板を支持するようにインボリュート形状の曲面壁(実機の集電体(Current collector)に相当。以下、集電体と呼ぶ)が設置されている。円板中心から

供給された作動ガスは、集電体によって等分割された領域内を外周に向かって流下する。その結果、平行円板間にはインボリュート曲線に沿う旋回流れが導かれる。なお、本研究では集電体表面に沿うインボリュート曲線座標 ξ 、これに垂直な座標 η を採用し、集電体の長さ ξ_0 と流路幅 η_0 を用いて適宜無次元化を施した。

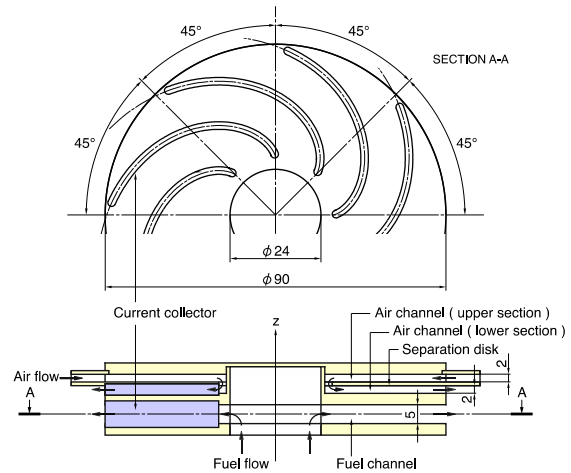


図 1 ディスク型モデル流路

流路内の速度場は、粒子画像流速計(PIV)またはレーザードップラー流速計(LDV)を用いて計測した。また、流路壁面には圧力孔を設置し、チューブを介して取り出された圧力と大気圧の差圧を微差圧計測システムによって測定することで、壁面静圧分布を取得した。さらに、平行円板流路内に生じる温度場の特性を調べるため、ディスク型 SOFC の電極面に相当する円板表面を等熱流束条件で加熱し、熱電対をトラバースして流路内の温度分布を測定した。なお、伝熱実験は、寸法を 5 倍に設定した幾何学的に相似な流路を用いて実施した。また、いずれの実験においても、SOFC 運転時の流れ場と力学的に相似なレイノルズ数および流量を設定し、これらをパラメータとして計測を行った。

4. 研究成果

(1) 円板間旋回流れの圧力特性

都市ガスを燃料とする SOFC モジュールは一般に燃料供給圧力が低く、SOFC 内はきわめて低レイノルズ数($Re \sim 10$ 程度)の流れとなる。したがって、加圧仕事を抑えて総合効率の低下を避けるためには、圧力損失を抑制しながら流れ場を適正化しなければならない。そこで、速度場の均一性が確認されたインボリュート型流路内の旋回流れについて、圧力分布を調べた。

図 2 は、流量が 3.0L/min の場合に PIV で計測した速度 U_ξ/U_0 の流路幅方向分布を、壁面静圧 P_w の流路幅方向分布と比較したものである。速度分布は、流路中流域($\xi/\xi_0 = 0.60$)を除いて概ね一致しているが、静圧は上流から下流へ向けて単調に低下していることがわかる。また、流路上流側($\xi/\xi_0 = 0.40$)で

は η の正方向に向かう圧力こう配が生じているが、その傾きは流路下流へ進むにつれて徐々に小さくなり、 $\xi/\xi_0 = 0.50$ では、 η の負方向に向かう圧力こう配が観察される。

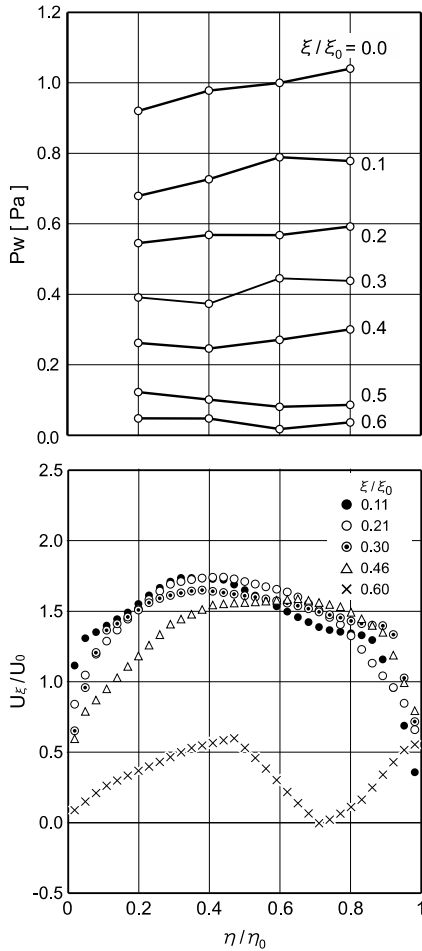


図2 速度分布および圧力分布

以上のような旋回流れにおける静圧挙動を把握するため、一様流の理想条件下で Navier-Stokes 方程式の η 方向成分を積分し、次式に従って η 方向の静圧分布を評価した。

$$P_w(\eta) = \rho U_0^2 \cdot \ln\left(1 + \frac{\eta}{R}\right) + \frac{\mu U_0}{2\phi} \left[\frac{1}{R} - \frac{R}{(R + \eta)^2} \right]$$

上式から、右辺第1項によって、 η が増加すると静圧も上昇することがわかる。この項は向心方向加速度の積分から得られ、旋回に必要な加速度が流れと直交する方向の圧力こう配によって維持されることと対応している。また、下流へ向かうにつれて圧力こう配が低下するのは、上式の第2項・第3項と関連しており、インポリュート曲線の曲率半径 R が ξ とともに増加するためである。すなわち曲率半径の短い流入部では大きな向心方向加速度が必要であり、圧力こう配が高い値をとることがわかる。なお、上述のように、流路幅方向に発生する圧力こう配を避けることはできないが、あらかじめ流路入口で旋回方向の速度成分を付与することによって流路内の静圧を下げ、流れ方向への圧力変化を

緩やかにすることは可能である。

(2) 速度分布の一様性向上

これまでの研究により、ディスク型流路内にインポリュート形状の集電体を配置することによって、流れ方向の速度分布が一様な状態に改善されることを実証したが、その一方で、局所的な流れの偏向や中流域以降での減速傾向などが観察された。これらの現象を解消するためには、流路間隔を狭めて強制的に速度の均一化を促進する手法が有効であると考えられる。ただしその場合、集電体の設置数増加による速度分布の一様性向上と摩擦損失の増大という相反する効果を考慮して集電体の配置を定める必要がある。ここではまず、集電体間隔を狭めて流路ピッチを流路幅の2倍にしたモデル流路を作製し、LDVによる速度計測を行った。

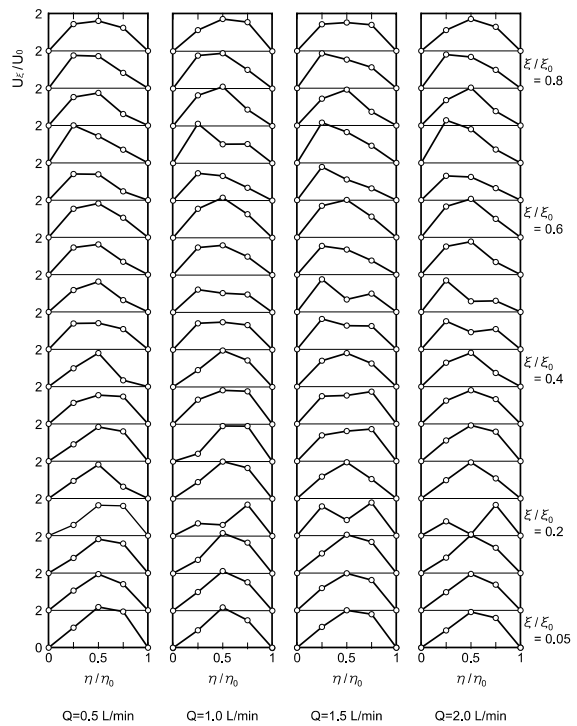


図3 新規流路内の速度分布

図3は、上述の新規流路において測定された速度分布をバルク速度 U_0 で無次元化したものである。前掲の図2と比較すると、新規流路では $\xi/\xi_0 = 0.05$ から 0.85 に至る広い範囲でほぼ同じ流速が維持されており、速度の一様性を向上させる効果が認められた。集電体間隔が2mmのため計測点数が少なく、速度分布の形状を正確に確定することは難しいが、流速の最大値がバルク速度の約1.5~2倍となっていることから、近似的にはポアズイユ流れの状態で流動しているものと推定される。

(3) 平行円板間旋回流れの伝熱特性

ディスク型 SOFC の燃料流路を模擬した平行円板流路を用いて、流路内の温度分布を測定した。実験は2種類の集電体配置に対して行い、流体が円板間を放射状に流

れる場合と、インポリュート曲線に沿って流れる場合について、温度場を比較した。

一例として、インポリュート曲線に沿う流れで測定された加熱面垂直方向の温度分布を図4に示す。縦軸は流路高さ H 、横軸は壁面温度 T_w と上流大気温度 T とで無次元化し、流れ方向 (ξ 方向) へ発達する温度分布を比較している。加熱面近傍の温度こう配は極めて大きいこと、下流へ向かうにつれて温度分布が高温側へ発達していることがわかる。この結果は、放射状流れで計測された温度分布より高温であったが、その原因は集電体間に流入する流量の相違によるものと考えられる。

図5は、図4の温度分布に対して得られた局所ヌセルト数の流れ方向分布である。本実験条件下では主流温度を確定することができず、また発達過程にある速度境界層内の流速分布も明らかではないため、熱伝達率を正確に推測することは難しいが、流入気体の状態を基準にとり、加熱面との温度差に基づく熱伝達率を用いることで局所ヌセルト数 Nu を定義した。ヌセルト数は流れ方向にほぼ一定であり、また低流量時 ($Q=15\text{L/min}$) にヌセルト数はやや低い値を示すものの、流量に対する著しい相違は見られない。これは、インポリュート形状の流路では流速が一定に保たれ、熱伝達も大きく変化しないことが原因と考えられる。一方、放射状流れの場合は減速流れとなるため、ヌセルト数は半径方向に減少し、図5を下回る値が測定された。

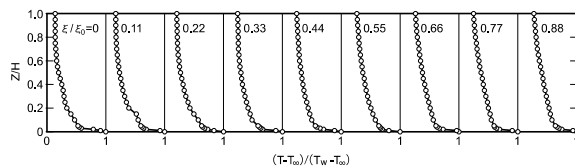


図4 壁面垂直方向の無次元温度分布

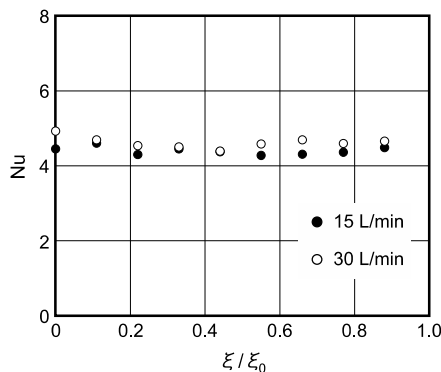


図5 局所ヌセルト数

以上のように、同サイズの平行円板流路であっても、円板間の流動形式によって熱伝達特性は異なるものとなり、インポリュート形状の流路を用いると、流路内でほぼ一定のヌセルト数を実現することができ、熱伝達性能は放射状流路の場合より向上することが明

らかとなった。すなわち、伝熱特性の観点からも、インポリュート形状流路の優位性が示されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計3件)

- 鈴木健之, 坂本祥仁, 佐藤駿斗, 角田和巳, “ディスク型 SOFC 流路における旋回流れの圧力特性,” 日本機械学会第 91 期 流体工学部門講演会講演論文集 (USB), 福岡, (2013.11.9), 2 pp.
- 網中一公, 角田和巳, 坂本祥仁, “ディスク型 SOFC 流路における速度場・圧力場の特性,” 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, No.120-1, 津田沼, (2012.3.10), pp.161-162.
- Tsunoda, K. and Aminaka, K., “Effects of Swirl on Velocity-Field Uniformity in Disk Shape SOFC Channel Flow,” ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conference 2011 (CD-ROM), Hamamatsu, Japan, (2011.7.27), 8 pp. 査読有り

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecl.mech.shibaura-it.ac.jp/Laboratory/home.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

角田 和巳 (TSUNODA KAZUMI)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：70255644

(2)研究分担者

末包 哲也 (SUEKANE TETSUYA)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究部

研究者番号：30262314

(3)連携研究者

なし