

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420123

研究課題名(和文) ディスク型SOFCを模擬した多孔体円板流路における加熱旋回流れの最適化

研究課題名(英文) Optimization of heated swirling flow in a disk shape porous channel for planar-type 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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：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、流路内に金属多孔質体からなるインボリュート曲線形状の集電体を配置し、集電体間に生じる旋回流れの速度分布を詳細に検討した。その結果、集電体の壁面付近における流速の急激な減少が抑制され、集電体表面と垂直方向の速度成分が明瞭な値を持つことがわかった。一方、インボリュート曲線に沿う流れは維持されにくくなるが、流路幅方向に沿う速度分布の不均一性は抑えられた。また、伝熱実験によって、加熱された多孔質面近傍の速度分布に不均一性が生じる可能性があることを明らかにし、速度分布が設計上重要となることを指摘した。

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 electrical efficiency and have many kinds of cell geometries. In this study, we focused on a disk shape planar-type SOFC and designed a channel with circle involute shape current collectors. Swirling flow phenomena in a model disk channel with porous wall were investigated. In the case of applying circle involute shape current collectors made of porous metal, a rapid reduction of a velocity close to their surface was reduced. Furthermore, a velocity component normal to the current collector had positive value due to the gas flow permeating porous metal. These phenomena led to the discrepancy from the streamline along the involute curve. These characteristics were remarkable with increase in permeability and porosity of the current collectors. This result suggests that an optimum range of permeability and porosity of the current collector exists for favorable flow fields in the disk shape SOFC.

研究分野：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 熱伝達

1. 研究開始当初の背景

燃料電池は分散発電の中核を担う技術の一つであり、高温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、このような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 の信頼性・耐久性を高め、SOFC 単体としての発電効率を向上させることが重要となる。

一方、SOFC はセルが固体で構成されているため流路形状の選択肢が豊富であり、集電体の形状や配置、ガスの導入方法に関して設計の自由度が高い。そこで本研究では、ディスク形状の平板型 SOFC にインボリュート曲線形状の集電体を配置することを提案し、その結果生じる旋回流れによって、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。このような流れ場の一様化は温度こう配の解消にとって有効な手段となりうるが、一方で局所的な流れの偏向や集電体近傍における減速領域の存在も明らかとなり、検討の余地があることが示唆された。

2. 研究の目的

前述のような旋回流れの導入効果を詳細に評価するためには、SOFC の運転時に発現する温度分布特性を踏まえた検討が不可欠と言える。また、実際の SOFC はガス流と接する流路壁面が多孔質性電極であり、界面の状態が流れに及ぼす影響も考慮するべき要素の一つである。さらに、電流経路を確保するために流路内に配置する集電体 (Current collector) が、作動ガスの抵抗として作用することを考えると、多孔質体で構成された集電体を導入することも抵抗軽減策として有効である。

これらの課題を踏まえて本研究では、多孔体材料で構成されたディスク型流路を用いて加熱条件下で多孔体壁面と干渉する旋回流れの速度場および温度場を調べ、流れ場改善の実現性と、これに関連する熱流体挙動について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

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相違はない。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、燃料流路のモデルチャネルを示したものであり、内径 24mm、外径 122mm の中空円板を積層することで流路が構成されている。作動ガスは円板中央のガス流入口から供給され、隙間高さ 2mm の円板間を通り外周に向かって流動する。上下の円板は、インボリュート形状の曲面壁を円周方向に等間隔で 8 枚設置することによって支持されて

いる。これらは実機の集電体に相当するものであり、前述のように多孔質集電体の効果を検証するため、透過性を有する Ni 製金属多孔質体 (セルメット、住友電気工業) およびアクリル板でインボリュート曲面を製作し、それらを二対交互に取り付けた。集電体の厚さはいずれも 2mm であり、隣り合う集電体の距離 (流路幅) は 9.8mm に設定した。集電体に使用した金属多孔質体は三種類であり、気孔率 ϕ および透過率 K の組み合わせは $\phi=78.8\% \cdot K=0.40 \times 10^{-8} \text{m}^2$ 、 $\phi=84.2\% \cdot K=2.42 \times 10^{-8} \text{m}^2$ 、 $\phi=88.7\% \cdot K=5.17 \times 10^{-8} \text{m}^2$ となっている。本実験では、作動ガスに燃料の代替として空気を用いており、実験条件には 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た。また、円板と垂直に二次元レーザードップラー流速計 (LDV) を配置し、集電体間における時間平均速度分布を測定した。なお、図 1 の実験装置は集電体の透過性について調査することを目的としており、非加熱条件下で計測を行っている。座標系は、集電体表面に沿う座標軸 ξ と、これに垂直な座標軸 η からなる直交曲線座標を採用した。また、集電体の長さ ξ_0 と流路幅 η_0 によって適宜無次元化を施した。

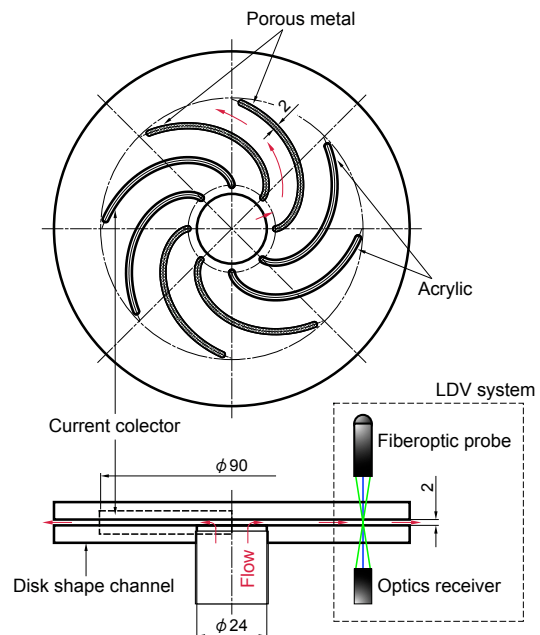
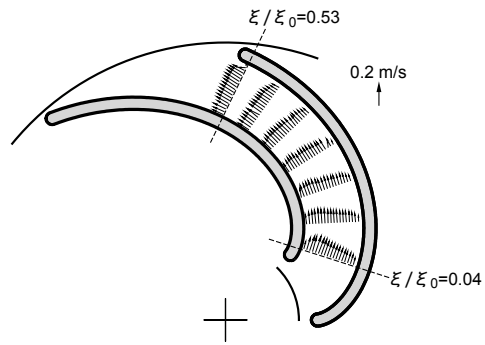


図 1 ディスク型モデル流路

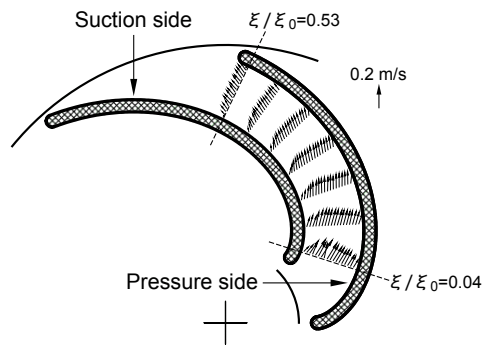
4. 研究成果

(1) 円板間旋回流れの速度分布特性

図 2 に円板と平行な面内における旋回流れの平均速度ベクトルを示す。図 2 (a) は透過性を持たないアクリル製集電体を配置した場合、図 2 (b) は気孔率が最も高い多孔質集電体を配置した場合であり、供給流量が $Q=1.0 \text{ L/min}$ における結果を代表例として記載した。図 2 (a) を見ると、透過性の無い集電体で挟ま



(a) 非透過性集電体



(b) 透過性多孔質集電体 ($\phi=88.7\%$)

図2 平均速度ベクトル

れた流路では、おおむねインボリュート曲線に沿う流れとなっているが、流路入口から中流域にかけては Suction side 付近の流速が高く、流路幅方向に非対称な速度場が生成されていることがわかる。一方、図 2 (b) から、透過性を持つ多孔質集電体に挟まれた領域では、流路幅方向に沿う速度の不均一性が図 2 (a) の場合より抑えられていることが確認できる。ただし、速度ベクトルの向きは流路全域において Pressure side 側へ傾いており、作動気体が Suction side 側の集電体から浸透し、Pressure side 側の集電体から透過していく様子が見えてくる。

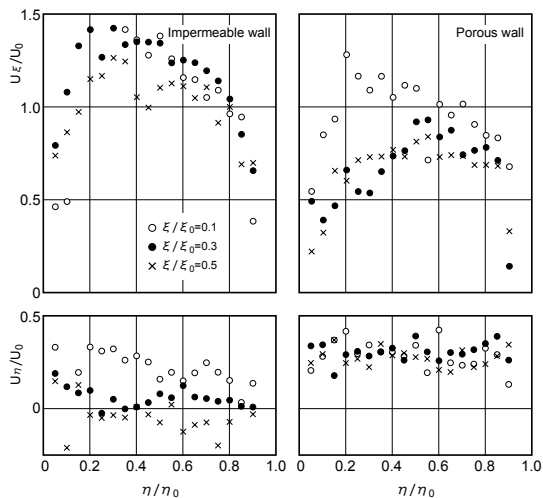


図3 各流速成分の平均速度分布

図 3 は、各流速成分 U_{ξ} , U_{η} の流路幅方向に沿う速度分布をバルク速度 U_0 によって無次元化したものであり、 $Q=2.0$ L/min の流量条件に対して得られた結果を示している。透過性の無い集電体を配置した流路では (図 3 左), U_{ξ} のピークは Suction side 側に出現しており、特に流路入口付近 ($\xi/\xi_0=0.1$) においてその傾向が著しい。また、 U_{η}/U_0 の値は流路入口付近を除くと流路幅方向にわたって約 ± 0.2 の範囲内にあることから、図 2 (a) で確認したように、インボリュート曲線に沿う流れがほぼ実現されていると判断できる。

一方、多孔質集電体に挟まれた流路における U_{ξ} の分布 (図 3 右) を見ると、 $\xi/\xi_0=0.1$ では Suction side 側に U_{ξ} のピークが見られるものの、 $\xi/\xi_0=0.3, 0.5$ では比較的平坦な分布となっており、前述のような明瞭なピークの存在は認められない。特に Pressure side の集電体表面付近では、 U_{ξ} の減少が明らかに抑制されていることがわかる。また、 U_{η}/U_0 は正值のみをとり、その分布は $U_{\eta}/U_0=0.25$ 程度を中心にやや変動している。このことから、透過性を有する集電体を配置した流路では Pressure side に向かう速度成分が有意になり、流線がインボリュート曲線から逸れることが確認できる。インボリュート曲線を側面を持つ流路の断面積は一定となるため、 ξ 方向に沿って作動ガスが進めば U_{ξ} も一定となるが、側面が透過性を持つ場合にはこのような流れの状態は維持されず、実質的には拡大流路としての性質を持つことになる。したがって、速度分布が前述のような傾向を示すと考えられる。

(2) 多孔質集電体近傍における流速の挙動

図 4 に、多孔質集電体の両側面近傍で計測した U_{ξ} , U_{η} の詳細な分布を示す。 U_{ξ} は集電体に近づくにつれて徐々に低下する分布となっており、壁面付近の急激な減速が抑えられていることがわかる。とりわけ、流路上流

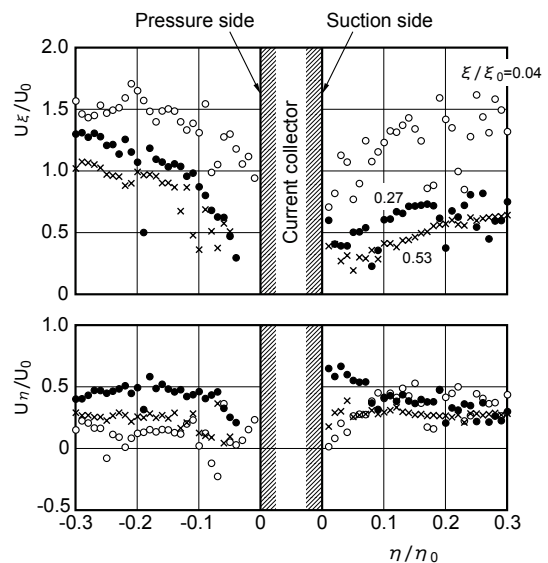


図4 集電体近傍の速度分布

($\varepsilon/\varepsilon_0=0.04$)の集電体近傍では比較的高い流速が保たれており、集電体表面のすべり速度を測定値の補間によって見積もると、 $\eta < 0$ の側で $0.7 U_0$ 程度、 $\eta > 0$ の側で $0.6 U_0$ 程度となっている。このような速度こう配の減少から、多孔質集電体が摩擦抵抗の軽減をもたらすことが期待できる。さらに、 U_η が集電体付近で正值をとることから、集電体を流れが透過している状況が確認できる。特に流路中流域($\varepsilon/\varepsilon_0=0.27$)では、他の位置と比べて U_η の値が $0.5 U_0$ 程度と高く、上流から下流の間で透過量に差のあることが示唆される。

(3) 多孔質体表面に沿う境界層流れ

以上のように、多孔質集電体付近では従来と異なる速度場が観察されたが、計測精度の制約から、正確な速度分布を把握するまでには至らなかった。しかし、多孔質面付近の詳細な速度場を理解することがSOFCの流路設計過程で必要となることから、その第一段階として、最も簡単な平板形状の多孔質体を二次元平行流路内に設置して、多孔質体表面に沿う境界層流れの特性を調査した。

図5は、熱線流速計によって計測した多孔質体表面上の境界層内速度分布を、無次元表示したものである。図中には比較のため、透過性の無いなめらかな平板上で測定した速度分布も記載した。いずれも主流レイノルズ数はほぼ同じであるが、多孔質面上では透過流の影響によりすべりが存在し、すべり速度の大きさが $0.2 U_0$ 程度に達していることがわかる。さらに、平板上に発達した層流境界層の速度分布と比べ、壁面垂直方向の速度こう配が緩やかになっており、多孔質面近傍において減速が抑えられるとともに、壁面せん断応力も低下する可能性があることが確認された。したがって以上の結果から、透過性多孔質体をSOFCの集電体に利用すると集電体付近における速度こう配を緩和することが可能であり、これにより圧力損失が低減されると考えられる。ただし、同時に測定した速度変動成分を比較したところ、多孔質面上では、壁乱流で観察される乱れ強さより大きな速度変動が観察され、速度変動の卓越

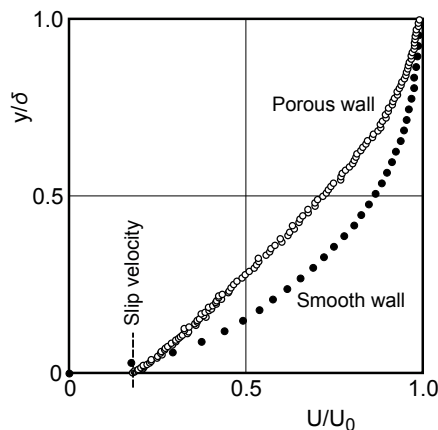


図5 多孔質面上の境界層内速度分布

している領域も主流側に拡大していることが明らかとなった。これは、透過流が存在していること、多孔質体の気孔分布が不規則であることなどが影響していると推測され、実際のSOFC運転時には電池反応の不安定性をもたらす可能性があり、今後検討することが必要である。

(4) 加熱多孔質面上の旋回流れ

ディスク型SOFC流路の円板に多孔質セラミック($\phi=40\%$, $K=1 \times 10^{-12} \text{m}^2$, 気孔径 $50 \sim 100 \mu\text{m}$)を使用することで電極面を模擬し、これを等熱流束加熱することにより、加熱条件下で生じる円板間旋回流れの挙動を調査した。本実験では、詳細な速度分布や温度分布を計測するため、円板間隔 $h=11\text{mm}$ のディスク型流路を使用し、流量を $Q=1.5 \times 10^3 \text{L/min}$ に増やして作動ガスを流した。

図6は加熱面垂直方向の速度分布を示したもので、縦軸は z/h 、横軸は流路入口の最大流速 U_m によって無次元化されている。 $\varepsilon/\varepsilon_0=0$ において非対称性の強い速度分布となっているのは、作動ガスが導入管から平行円板間に流入する際、流れの向きを直角に変えるためであり、その結果生じた偏流が速度分布形状に反映されたと考えられる。 $\varepsilon/\varepsilon_0=0.11$ より下流では上記のような強い非対称性は見られないが、加熱面側の境界層内では速度分布が相似とはならず、 $\varepsilon/\varepsilon_0$ の違いによる速度差が観察された。このような現象は、反応面への燃料浸透に不均一性をもたらす可能性があるため、速度分布特性を踏まえて燃料供給制御を行うことが重要であると考えられる。

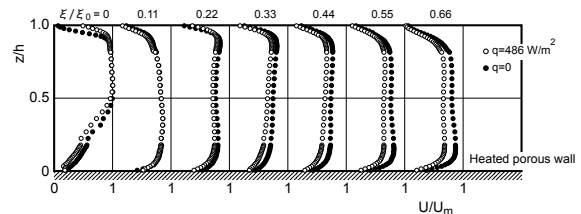


図6 加熱旋回流れの速度分布

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4件)

1. 佐藤駿斗, 武藤浩紀, 角田和巳, “透過性多孔壁を持つディスク型SOFC流路内の旋回流れ,” 日本機械学会関東支部第21期総会講演会講演論文集(CD-ROM), 横浜, (2015.3.20), 2 pp.
2. 大塚圭, 芝本隆大, 角田和巳, “加熱面上に設置した透過性多孔体平板後方の流体挙動,” 日本機械学会第93期流体工学部門講演会講演論文集(USB), 東京, (2015.11.8), 2 pp.

3. 武藤浩紀, 角田和巳, 二瓶達彦, “ディスク型 SOFC 流路内の速度場に及ぼす集電体の透過率・気孔率の影響,” 日本機械学会関東支部第 22 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), 東京, (2016.3.10), 2 pp.
4. 芝本隆大, 角田和巳, “透過率・気孔率の異なる多孔質体で構成された直立平板後方の流れ,” 日本機械学会東北支部第 52 期総会講演会講演論文集 (USB), 仙台, (2017.3.14), 2 pp.

[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/research.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

(4) 研究協力者

なし