

京都大学	博士 (工学)	氏名	Mao Runze
論文題目	Development of a multipoint temperature measurement system based on resistance network and its application to solid oxide fuel cells (抵抗ネットワークに基づく多点温度計測システムの開発とその固体酸化物形燃料電池への応用)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) を主な対象とし、作動中の燃料電池の内部温度分布計測を可能な限り軽微な侵襲で行うことを目的とした新規の多点温度計測法を提案している。提案した手法の評価を行いその特性を明らかにしたうえで、商用サイズの SOFC の温度計測に適用して提案手法の有効性を示しており、電池の性能や耐久性の向上を目指す上で有用な知見を得ている。本論文は 5 章から構成される。</p> <p>第 1 章は序論であり、SOFC の安全で効率的な作動や耐久性能の向上のためには、多数のセルを連結して構成される SOFC スタックの内部温度分布を正確に把握し適切に制御することが重要であることを指摘している。信頼性の高い温度分布の実測データが研究開発の基盤として必要であるが、高温、高電流、狭隘流路で特徴づけられる SOFC にあって、光路の確保が必要な赤外線カメラによる計測や、計測・接続のための導線数がセンサー数に比例して増加する熱電対といった従来手法での多点温度計測が困難であることを概説し、導線数が相対的に少なく低侵襲な多点温度計測法を開発することの意義を明らかにしている。</p> <p>第 2 章では、測温抵抗体 (Resistance Temperature Detector : RTD) とコンデンサーで構成される並列回路を要素とし、複数の並列回路要素を直列に接続したうえで回路全体のインピーダンスをインピーダンス分光法により測定し、等価回路フィッティングを経て推定した各 RTD の抵抗値から RTD 設置位置における局所温度を評価する手法を提案している。その際、各並列回路要素の特性時間スケールが互いに異なるようにコンデンサーの容量を選択することで、コンデンサーを RTD のマーカーとして機能させている。複数の並列回路要素を直列接続するため、理想的には外部への引き出し導線数を 2 本まで減らすことが可能である。これらを確認するため、1~4 個のセンサーをもつ回路を作製し、ペルチェ素子を用いて個々のセンサーの温度を室温から約 360K の温度域で制御することで基礎的な実験を実施している。その結果、基礎実験の条件範囲における温度測定の精度は熱電対による測定値を基準として 0.7K と小さいことを示し、提案した測定コンセプトの実現性を確認している。</p> <p>第 3 章では、多数の RTD を格子状に連結した回路を用いて、回路の外縁部に逐次的に直流電圧を印可した際の応答電流および電圧印加位置以外の外縁部電位を測定し、それらの測定値から格子状回路内の各 RTD の抵抗値を解析的に求めることで、RTD の位置の局所温度の分布を推定する手法を提案している。まず室温から約 360K の温度域で予備実験を実施して提案手法の実現性を確認したのちに、電極面積が 72mm×72mm である商用サイズの平板 SOFC 単セルにおいて、12 個の RTD で構成される格子状回路を空気流路側セパレーター内に設置することで、温度分布の計測を行っている。その結果、電流密度ゼロで発電反応がなくそれゆえセル温度が一樣とみなせる状態で電気炉温度を種々に変更する実験を通じ、SOFC の作動温度域である約 970K において提案手法は従来の熱電対基準で 0.5K の精度をもつことを明らかにしている。この平板 SOFC に燃料</p>			
京都大学	博士 (工学)	氏名	Mao Runze

京都大学	博士 (工学)	氏名	Mao Runze
------	---------	----	-----------

として水素、酸化剤として空気を対向流形式で供給して実施した発電試験を対象に、本章で提案した手法による温度測定を行ったところ、平均電流密度の増加に伴い大きくなるセル内の発熱量を反映してセルの温度が上昇すること、セル端からの外部への放熱によりセル中央付近の温度が相対的に高くなることなど、平均電流密度がセルの温度分布に与える影響を捉えることに成功している。

第4章では、第3章で提案した手法において、応答電流と格子状回路外縁部の電位の測定値から各RTDの抵抗値を求めている解析過程を、人工ニューラルネットワークによってRTDの抵抗値を推定する方法に置き換えることで、解析的に計算する場合よりも少ない測定データ数で温度分布を推定する手法を提案し、温度分布の推定に使用する測定データ数が推定精度に与える影響について系統的に調査している。その結果、解析的に計算する場合と同程度である0.6Kの推定精度をより少ない測定データ数で実現できること、ただしデータ数を過度に減少させると推定精度が顕著に低下することを明らかにしている。さらに、第3章と同様に12個のRTDで構成される回路をSOFC単セルに適用し、人工ニューラルネットワークによる推定手法でも第3章の温度測定結果を再現することができ、解析的な手法に対して遜色のない結果を与えることを明らかにしている。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、提案手法の汎用性を指摘したうえで、考えられる将来の展開を述べている。

氏名	Mao Runze
----	-----------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) を主な対象とし、作動中の燃料電池の内部温度分布計測を可能な限り軽微な侵襲で行うことを目的に、それを実現するための多点温度計測法を提案し、提案した手法の評価を行いその有効性を示すとともに特性を明らかにした研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 測温抵抗体 (Resistance Temperature Detector : RTD) とコンデンサーで構成される並列回路を要素とし、複数の並列回路要素を直列に接続したたうえで回路全体のインピーダンスをインピーダンス分光法により測定し、等価回路フィッティングを経て推定した各 RTD の抵抗値から RTD 設置位置における局所温度を評価する手法を提案した。その際、コンデンサーの容量を適切に選択することで、コンデンサーを RTD のマーカーとして機能させた。室温から約 360K の温度域での基礎実験を行った。その結果、提案手法による温度測定の精度は熱電対による測定値を基準として 0.7K と小さいことを示し、この測定コンセプトの実現性を示した。
2. 多数の RTD を格子状に連結した回路を用いて、回路の外縁部に逐次的に直流電圧を印可した際の応答電流および電圧印加位置以外の外縁部電位を測定し、それらの測定値から RTD の抵抗値を解析的に求めることで、温度分布を推定する手法を提案した。商用サイズの平板 SOFC 単セルを対象に、12 個の RTD から成る格子状回路を用いて温度分布の計測を行った。その結果、SOFC の作動温度域である約 970K において提案手法は従来の熱電対基準で 0.5K の精度をもつことを示した。さらに平均電流密度の増加に伴って増大する発熱量を反映してセル温度が上昇すること、セル端からの外部への放熱によりセル中央付近の温度が相対的に高くなることなど、平均電流密度がセルの温度分布に与える影響を明らかにした。
3. 上記 2 の RTD の格子状回路を用いる手法において、応答電流と電位の測定値から RTD の抵抗値を求める過程を、人工ニューラルネットワークによる推定に置き換える手法を提案し、推定に使用する測定データ数が精度に与える影響について系統的に調査した。その結果、解析的に計算する場合と比して遜色のない 0.6K の推定精度をより少ない測定データ数で実現できること、ただしデータ数を過度に減少させると推定精度が顕著に低下することを明らかにした。

本論文は、以上のように、従来よりも低侵襲な多点温度計測法に関するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 8 月 2 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。