

学 位 論 文 題 名

ロボット用自然給気型燃料電池の基本構造と 性能特性に関する研究

学位論文内容の要旨

固体高分子形燃料電池（PEMFC）は自動車用（50kW以上）、定置用（1kW～50kW）、移動・携帯用（数百W以下）として、様々な用途に応じた研究開発がなされている。自動車用や定置型では高圧水素もしくは炭化水素による改質ガスを用いるものが主流であるが、移動用および小型燃料電池では手軽で安全な供給燃料が要求されることから、メタノールを直接セルに供給するダイレクト・メタノール燃料電池（DMFC）に対する研究が100W以下の用途に関して盛んになされている。しかし、数百Wから1kW間に位置する小型携帯用電池についてはそれほど多くの研究開発が行われていない。このクラスに相当するロボット用電源を考えた場合、DMFCでは出力ならびに効率が低く、しかも大型となるために、小型の水素ポンペを搭載したPEMFCがむしろ適しているように思われる。そこで本研究では、数百Wから数kWクラスの水素燃料によるロボット用燃料電池を対象とし、コンプレッサーや加湿器等の補機を持たない自然給気型燃料電池に関する最適基本構造とその際の性能特性について研究を行った。まず、基本構造として小型携帯電池で多用されている開放型（オープン型）と積層化可能なチャンネルタイプの比較を行い、それぞれの特徴を明らかにしたほか、ロボット用としての評価を行った。次に、加湿器を持たないために生じるドライアウト現象に的を絞って、送風量や温度条件によるドライアウト状態の変化を解析した。これにより、ファンの有効性と送風量に対する制限条件を明らかにした。最後に400Wのロボット用電池を対象として、サイズや重量に関する試算を行った。

論文は全5章で構成されている。以下にその内容と結果の概要を示す。

第1章は序論であり、研究の背景について述べるとともに、本研究の目的および得られた結果の概要について論述した。また、燃料電池一般についての概説、小型燃料電池の開発動向、自然給気型燃料電池の開発および研究動向についてとりまとめた。

第2章では、自然給気のためのカソード構造について比較・評価を行った。自然給気型燃料電池のカソードセパレータ構造として、小型電池で多用されているオープン型とチャンネル型の2種類が考えられる。オープン型では、カソードセパレータに貫通スリットを設け、これを通

して周囲空気が直接拡散層（GDL）に供給される構造となっている。一方、チャンネル型ではカソードセパレータは両端が大気に開放された直線形垂直チャンネル構造となっており、周囲空気が浮力によりチャンネル下端から上方向に供給される構造となっている。オープン型は空気に接する面が多く十分な給気が可能であるのに対して、チャンネル型では積層が可能となる利点を有している。実験では、まず有効反応面積 18 cm^2 の自然給気型電池を設計・製作し、カソードセパレータ構造が電池性能に及ぼす影響について比較を行った。チャンネル型電池では空気供給に大きな影響を及ぼすセパレータの流路幅および流路深さを種々変化させ、最適な形状について検討を行った。さらに、カソード流路内部の自然対流ならびにガス組成分布を三次元数値シミュレーションを用いて解析し、実験より得られたセパレータ形状の影響を考察した。

その結果、オープン型自然給気型電池は面圧分布を均一にかつ高く保つことが難しく、接触抵抗の増大を解決し難しいことが明らかとなった。一方、チャンネル型自然給気型電池は一律な面圧を保って接触抵抗を小さくすることができるほか、チャンネル形状を最適化することによって、十分な酸素供給が可能であることが分かった。さらにチャンネル構造ではセルの積層化が可能であり、小型で高性能なロボット用電池を実現する上で、オープン型よりも高い可能性があるものと判断された。また、3次元数値シミュレーションによって電池内の現象を把握することができ、チャンネル深さに対するチャンネル内酸素濃度分布状態の変化を明らかにすることができた。これにより、最適なチャンネル幅や深さ形状を示すことができ、本実験の結果範囲では流路幅 2 mm 、流路深さ 10 mm のチャンネル形状において、最大出力密度 105 mW/cm^2 を達成することができた。

第3章では、送風用ファンの必要性について明らかにするために、送風量に対するドライアウト状態の変化について実験を行った。無加湿ガスを供給する本燃料電池ではドライアウトが生じやすいために、必ずしも送風ファンの組み込みが優位となるとは限らない。そこで、空気流量の計測が可能な通常の強制給気電池を用いて、無加湿運転時の電池温度、ガス流量、および電流密度による電池性能の変化を計測した。

その結果、ドライガス条件では電池温度が低いほどドライアウトしにくくなるために、電池性能が良好となることが明らかとなった。逆に電池温度が 50°C 以上ではドライアウトが顕著に生じるために運転が困難であることが分かった。 50°C 以下の温度条件では生成水によって運転の継続が可能であり、空気流量が多い場合にはドライアウト現象と酸素拡散速度の向上がお互いにバランスし合っ、空気流量や電流密度にかかわらず電池電圧が概ね一定となることが分かった。これに対して空気流量を少なくした場合には生成水によってフラッディングが生じ始めるが、その境界領域においてフラッディングなしに電解質膜が最も良好に湿潤化される領域があることが明らかとなった。したがって、無加湿運転による燃料電池では、ファン等によって単に供給空気量を増大すれば良いと言うわけではなく、フラッディングの生じにくいセル構造が設計可能であれば、むしろ送風量は僅かでもよいことが明らかとなった。

第4章では、第2、3章の実験結果を用いて、次世代ロボットとして最近注目されているHONDAのASIMO電源を想定して、出力 400 W 級の自然給気型燃料電池の基本構造について

て検討を行った。その結果、4W程度の送風ファンを設置して、カソードセパレータ流路深さ2mmのチャンネル型セルとするのが最もコンパクト化でき、スタックサイズは200mm(W)×185mm(D)×45mm(H)のスタック(定格電流密度222mA/cm²)になると試算された。水素タンクを含めた総重量および体積はリチウムイオン二次電池と比べて、現状ではむしろ大型化してしまうが、DOEの目標水素貯蔵密度を持ったタンクを用いた場合には、5時間用仕様で重量的に1/5、体積的に3/4程度になると試算された。

第5章は本論文の結論であり、得られた結果の概要を示した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	近久武美
副査	教授	工藤一彦
副査	教授	武田靖
副査	教授	小川英之

学位論文題名

ロボット用自然給気型燃料電池の基本構造と 性能特性に関する研究

固体高分子形燃料電池 (PEMFC) は自動車用 (50kW以上), 定置用 (1 kW~50 kW), 移動・携帯用 (数百W以下) として, 様々な用途に応じた研究開発がなされている. しかし, 数百Wから1kW間に位置する小型携帯用電池についてはそれほど多くの研究開発が行われていない. このクラスに相当するロボット用電源を考えた場合, 小型の水素ポンペを搭載したPEMFCがアルコール等を燃料とするよりもむしろ適しているように思われる. そこで本研究では, 数百Wから数kWクラスの水素燃料によるロボット用燃料電池を対象とし, コンプレッサーや加湿器等の補機を持たない自然給気型燃料電池に関する最適基本構造とその際の性能特性について研究を行った.

まず, 基本構造として小型携帯電池で多用されている開放型 (オープン型) と積層化可能なチャンネルタイプの比較を行い, それぞれの特徴を明らかにしたほか, ロボット用としての評価を行った. オープン型では, カソードセパレータに貫通スリットを設け, これを通して周囲空気が直接拡散層 (GDL) に供給される構造となっている. 一方, チャンネル型ではカソードセパレータは両端が大気に開放された直線形垂直チャンネル構造となっており, 周囲空気が浮力によりチャンネル下端から上方向に供給される構造となっている. オープン型は空気に接する面が多く十分な給気が可能であるのに対して, チャンネル型では積層が可能となる利点を有している. 実験の結果, オープン型自然給気型電池は面圧分布を均一にかつ高く保つことが難しく, 接触抵抗の増大を解決し難しいことが明らかとなった. 一方, チャンネル型自然給気型電池は一律な面圧を保って接触抵抗を小さくすることができるほか, チャンネル形状を最適化することによって, 十分な酸素供給が可能であることが分かった. さらにチャンネル構造ではセルの積層化が可能であり, 小型で高性能なロボット用電池を実現する上で, オープ

ン型よりも高い可能性があるものと判断された。また、3次元数値シミュレーションによって電池内の現象を把握することができ、チャンネル深さに対するチャンネル内酸素濃度分布状態の変化を明らかにすることができた。これにより、最適なチャンネル幅や深さ形状を示すことができ、本実験の結果範囲では流路幅2mm、流路深さ10mmのチャンネル形状において、最大出力密度105mW/cm²を達成することができた。

次に、無加湿ガスを供給する本燃料電池ではドライアウトが生じやすいために、必ずしも送風ファンの組み込みが優位となるとは限らない。そこで、送風用ファンの必要性について明らかにするために、送風量に対するドライアウト状態の変化について実験を行った。その結果、ドライガス条件では電池温度が低いほどドライアウトしにくくなるために、電池性能が良好となることが明らかとなった。逆に電池温度が50℃以上ではドライアウトが顕著に生じるために運転が困難であることが分かった。50℃以下の温度条件では生成水によって運転の継続が可能であり、空気流量が多い場合にはドライアウト現象と酸素拡散速度の向上がお互いにバランスし合っており、空気流量や電流密度にかかわらず電池電圧が概ね一定となることが分かった。これに対して空気流量を少なくした場合には生成水によってフラッディングが生じ始めるが、その境界領域においてフラッディングなしに電解質膜が最も良好に湿潤化される領域があることが明らかとなった。したがって、無加湿運転による燃料電池では、ファン等によって単に供給空気量を増大すれば良いと言うわけではなく、フラッディングの生じにくいセル構造が設計可能であれば、むしろ送風量は僅かでもよいことが明らかとなった。

最後に、今回得られた実験結果を用いて、次世代ロボットとして最近注目されているHONDAのASIMO電源を想定して、出力400W級の自然給気型燃料電池の基本構造について検討を行った。その結果、4W程度の送風ファンを設置して、カソードセパレータ流路深さ2mmのチャンネル型セルとするのが最もコンパクト化でき、スタックサイズは200mm(W)×185mm(D)×45mm(H)のスタック（定格電流密度222mA/cm²）になると試算された。水素タンクを含めた総重量および体積はリチウムイオン二次電池と比べて、現状ではむしろ大型化してしまうが、DOEの目標水素貯蔵密度を持ったタンクを用いた場合には、5時間用仕様で重量的に1/5、体積的に3/4程度になると試算された。

これを要するに、著者は、ロボット用自然給気型燃料電池の基本構造と性能特性に関する新知見を得たものであり、エネルギー工学ならびに熱流体工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。