



Title	無水高温型PEFCの出力向上のための流路構造とHDV走行シミュレーションに関する研究
Author(s)	市川, 亮輔
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16841号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16841
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99686
Type	doctoral thesis
File Information	Ryosuke_Ichikawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 市川 亮輔

学 位 論 文 題 名

無水高温型 PEFC の出力向上のための流路構造と HDV 走行シミュレーションに関する研究
(Study on Flow Field Structure for High Power Output and HDV Driving Simulation in
Non-humidified High-temperature PEFC)

固体高分子形燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte FuelCell) は、運転中に二酸化炭素を排出せず、高効率であることから、環境負荷の低いエネルギー変換デバイスとして注目されている。PEFC は、始動性と負荷追従性に優れていることから、自動車などに利用されている。近い将来、大型商用車 (HDV: Heavy Duty Vehicle) などへ広く採用されることが期待されている。しかし、HDV で高負荷運転が必要な場合、PEFC の冷却能力不足が大きな問題となる。これは、PEFC と外気との温度差が小さいために発生する。従来型 PEFC は発電生成水による自己加湿で電解質膜のプロトン伝導性を確保している一方で、水が蒸発する 100 °C 以上では発電が困難になる特性に起因する。

そこで本研究では、100 °C 以上で動作可能である無水高温型 PEFC (以下、HT-PEFC) に着目した。HT-PEFC は電解質膜にプロトン伝導キャリアとしてリン酸をドーピングすることで無水環境下および高温 (~200 °C) での動作を可能にしている。したがって、HT-PEFC は外気との温度差を大きくし、冷却能力を向上させることができるため、HDV での高負荷運転が可能になると考えられる。さらに、HT-PEFC は、CO などの不純物に対する触媒耐性が高いこと、水管理が簡単であること、排熱の容易さ、熱回収率が向上することなどの利点もあり、これらはシステム設計の簡素化やコスト削減に繋がる。しかしながら、HT-PEFC を実車のパワートレインシステムにどのように適用できるかについての研究はほとんどない。本研究では、HDV に HT-PEFC システムを採用した際の有用性を評価することを目的に、2つのアプローチで研究を進めた。1つ目は実験による HT-PEFC の性能特性の明確化と高出力化のためのガス流路の検討である。2つ目は HDV 走行シミュレーションによる HT-PEFC の冷却性を含めた有用性の評価である。

第1章では、近年深刻化する地球環境問題に対する解決策の一つとしての PEFC の有用性を述べた。また、PEFC をはじめとする燃料電池の概要、PEFC が本格普及するための課題、HT-PEFC の必要性、本研究に関連する諸研究などをまとめることで本研究の位置づけを明らかにした。

第2章では、実験装置、実験手順、解析手法について述べた。本実験に用いた HT-PEFC セル、膜電極接合体 (MEA)、セパレータ流路、各種実験装置のほか、実験条件や手順、解析方法について記載した。ここで、HT-PEFC の基本性能に関する先行文献はあるが、HDV など要求される高負荷条件での研究は少なく、本研究では高負荷条件での HT-PEFC の発電特性の定量化に着目した。活性化過電圧、抵抗過電圧、濃度過電圧からなる3種の過電圧特性を、ターフェルの式を活用して過電圧分離する手法の説明を記した。またその中でも、高負荷領域で大きくなる濃度過電圧の発生メカニズムを明確にするため、限界電流密度法による酸素輸送抵抗の算出方法も記した。この手法により、従来と異なる高温環境下における、酸素モル濃度や酸素拡散性の影響を定量評価した。また、出力向上のためのガス流路構造として、2mm ピッチストレート流路 (リブ幅 1mm, チャンネル幅 1mm) を基準として、1mm ピッチストレート流路 (リブ幅 0.5mm, チャンネル幅 0.5mm)、多孔体流路、櫛歯型流路の評価

を実施した。

第3章では、実験結果として HT-PEFC の I-V 特性と性能向上に向けた評価・解析の結果を記載した。HT-PEFC の基本特性として、高温・高圧になる程、過電圧が減少し出力性能が良くなった。これらのメカニズムを過電圧分離と酸素輸送抵抗の算出で定量解析した。活性化過電圧は、高温での触媒活性の増大、高圧での酸素モル濃度の増大で低減されることがわかった。濃度過電圧は、高温で酸素モル濃度低下の影響を受けるが、高圧での酸素モル濃度増大、高温での酸素輸送抵抗減少が支配的因子となり、結果として低減されることがわかった。また、ガス流路構造によって、濃度過電圧に大きな差が生じることがわかった。2mm ピッチストレート流路では、リブ下における酸素輸送性の悪さが濃度過電圧の増大に寄与したと考えられる。比較して、他流路では酸素輸送性が改善され濃度過電圧を低減できることがわかった。

第4章では、HT-PEFC システムを用いた HDV 走行シミュレーションの構築について記載した。シミュレーションには、トヨタ自動車の第2世代 MIRAI のシステムをモデル化(カスタマイズが可能)した NEDO 産官学連携 FC シミュレータである FC-DynaMo を活用した。本研究では、登坂路を含む北米の HD(Heavy duty) パターンの導入、HT-PEFC を用いたパワートレインシステムの構築を行った。システムの構築において、第3章の実験で得た HT-MEA 特性の同定、冷却システムに関する内容を記した。従来の PEFC は、FCC(Fuel Cell Coolant) と呼ばれる専用の冷媒を用いた水冷システムが用いられることが多い。しかし、FCC の沸騰温度は約 100 °C であるため、HT-PEFC に直接使用することは困難である。そこで、水冷の代替として油冷の導入を検討した。本研究では、冷媒の物性、FC と外気の温度差、ラジエータサイズを用いて理論的に冷却能力を計算できる ε -NTU 法を導入することで、油冷システムを FC-DynaMo に実装することを可能にした。水冷媒に比べて油冷媒は熱的物性が劣るが、高温化で物性が改善することで十分な冷却能力が発現することがわかり、HT-PEFC に適応できると示唆された。

第5章では、油冷 HT-PEFC システムを用いた HDV 走行シミュレーション結果を示した。比較対象として、トヨタ自動車の第2世代 MIRAI のシステムをベースとした従来システムのシミュレーションも実施した。従来システムは、MIRAI サイズのラジエータ、エンジン HDV サイズのラジエータを備えた2仕様をシミュレーションした。シミュレーション結果として、正味出力、電流密度、セル電圧、熱排出率、冷却能力、セル出口温度、システム効率の挙動を比較した。従来システムでは大型のラジエータを使用することで、HD パターンを走破できた。しかし、ラジエータをエンジン HDV 同等の大きさに小さくすると、FC が 100 °C を超えてしまい走行不能に陥ることがわかった。一方で新たに構築した油冷 HT-PEFC システムでは、エンジン HDV 同等のラジエータでも走破可能(最高温度 183 °C)であることがわかった。FC と外気との温度差を大きく取り冷却能力を向上させる HT-PEFC の有用性を確認することができた。一方で、従来システムに比べて、出力効率・燃費は劣ることがわかった。これは、HT-PEFC の出力性能が低いこと、油冷化による補機損失の増大が主な要因であり、各研究開発分野における課題も明確化することができた。

第6章では結論として、本研究を通して得られた結果および考察をまとめた。