

燃料電池自動車の設計・評価・普及に関する研究

環境経済システム学分野

36653 長谷川貴彦

1. 研究背景と目的

運輸部門からの温室効果ガス排出量は 1990 年以降も増加しており、今後も排出量の増加が見込まれている。運輸部門の排出量の 90 % が自動車由来であり、また自動車からの CO₂ 排出量の 85 % が運用時からの排出であることから、CO₂ 排出量の少ない低公害車の導入による運輸部門の CO₂ 排出削減が有効である。

本研究では次世代の低公害車の本命とされる燃料電池自動車 (FCEV) の CO₂ 排出削減ポテンシャルを走行エネルギーシミュレータを用いて評価すると共に、FCEV 購入に関するアンケート調査のコンジョイント分析及び、実際の消費行動データに基づく車種選好モデルを利用した消費者の FCEV に対する選好調査を行い、FCEV の普及のための施策や利用方法の検討を行うことを目的とする。

2. 走行時の消費エネルギー算出

まず FCEV の走行特性を把握するためのケーススタディとして小型電気自動車 MC1EV を FCEV にコンバートすることを想定し、走行時におけるエネルギー消費をシミュレーションすることを行った。走行に必要な力 $F_{total}[N]$ は以下の式、

$$F_{total} = F_{roll} + F_{air} + F_{acc} \quad (1)$$

のように表される。式 (1) のパラメータはそれぞれ、 F_{roll} : 転がり抵抗、 F_{air} : 空気抵抗、 F_{acc} : 加減速抵抗を表している。式 (1) と動力伝達効率、最終減速比のパラメータより、所定の速度で走行させるために必要な力が求められ、これから所要トルクを算出することができる [1]。パラメータ中でデータが公表されていない、または直接測定することが不可能なデータに関しては走行時における電流・電圧の変化を測定することで、シミュレーション結果が測定値を再現できるように未知パラメータの値を推定した。

2.1 燃料電池システムの設計

設計にあたり、FC として入手可能かつ適当な出力をもつ荏原バード社の Nexa(出力 1.2kW) を想定した。また負荷変動を平準化するためのエネルギーストレージデバイスとして、大電力を高速にやり取りするのに適しているキャパシタを採用した。設計したシステムの概略図を図 1 に示す。

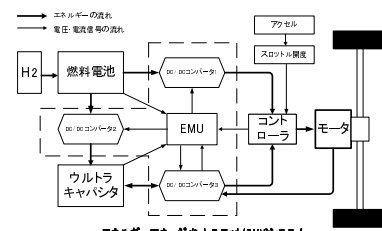


図 1 燃料電池システムの概略図

2.2 MC1-FCEV シミュレータによる試算結果

10 モード走行における CO₂ 排出係数の試算結果を、自家用自動車・軽自動車・原動機付自転車と比較したものを図 2 に示す。試算結果から自家用自動車・軽自動車に対し CO₂ 削減効果があるが、同様な輸送形態を持つ原動機付自転車に対しては CO₂ 削減効果がないことが分かった。これは FC の発電効率が低い事と、モータ出力と FC 出力の比が適切でなかったためにキャパシタでの充放電量が多くなり、効率が低下したためであると考えられる。

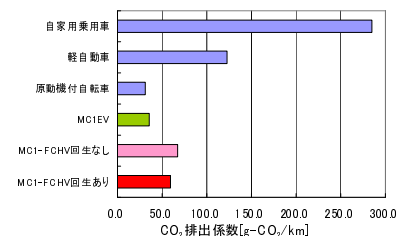


図 2 CO₂ 排出係数による比較

3. 乗用車サイズの燃料電池自動車 (FCEV) シミュレータの開発

MC1EV ベースのシミュレータをベースに、乗用車サイズ (マーク相当) の FCEV シミュレータを開発した。設定した FCEV の諸元の表 1 に示す。モータ及び車両のパラメータは [1] を参考に、FC・バッテリー・水素関係のパラメータは既存の FCEV の値を参考にして設定した。

表 1 車両パラメータ

空車重量	1159kg	
乗員[1人当たり55kg]	2人	
FCHV化に伴う重量増	200kg	
MC1-FCHV重量	1468kg	
モータ出力	種類	交流同期電動機
	最大出力	75kW (102HP)
	最大トルク	206N・m
燃料電池最大出力	種類	交流同期電動機
	最大出力	206N・m
燃料	種類	純水素
	貯蔵方式	高圧タンク(35MPa)
	ポンプ容量	180 l
	供給可能ガス量	42.9m ³
2次電池	種類	ニッケル水素電池
	容量	47.6Wh
	最大出力	37.8kW

3.1 FC 制御システムの設計

FC システムを最適に運用するための制御ロジックの設計を行った。図 3 に示すように FC 効率の悪い低出力域で EV 走行、出力が上昇するにつれて部分負荷による FC 運転、バッテリーのアシストによる FC 出力効率の最適化によって車両効率を向上を図っている。

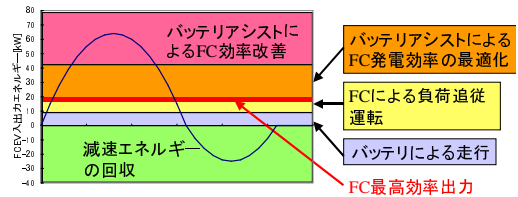


図 3 FC 制御システム

3.2 FCEV シミュレータによる計算結果

10・15 モード走行時において、FCEV シミュレータにより試算された CO₂ 排出係数について図 4 に示す。グラフ中の FCEV の CO₂ 排出係数において、色が異なる部分の上限と下限は [2] に示す 4 種類の FC 効率目標値を用いた試算結果を示している。図 4 より、FCEV の CO₂ 排出量は自家用自動車の 1/3 程度、軽自動車の 3/4 程度であり、大幅な CO₂ 排出削減ポテンシャルが存在することが示された。

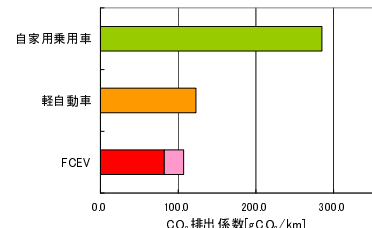


図 4 CO₂ 排出係数による比較

3.3 消費エネルギーの平均走行速度依存性

平均速度の異なる走行パターンにおける消費エネルギーと CO₂ 排出係数の変化を図 5、図 6 に示す。図 5 より、平均走行速度が低い領域でガソリン車よりも車輛効率が大幅に向上していることが示された。これは回生ブレーキによる減速エネルギーの回収と、部分負荷効率の高い FC の特性によるものと考えられる。また、図 6 より、平均走行速度が 50km/h 以下の領域においてガソリン車に対して CO₂ 排出削減効果が大きいことが示された。

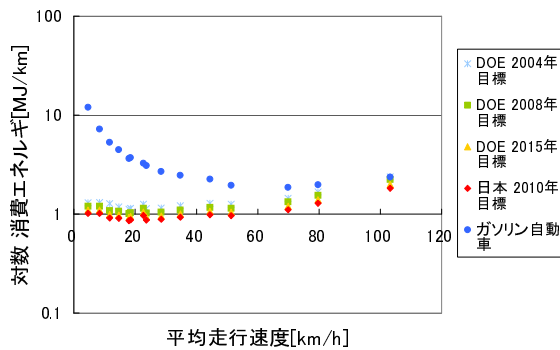


図 5 消費エネルギーの平均速度依存性

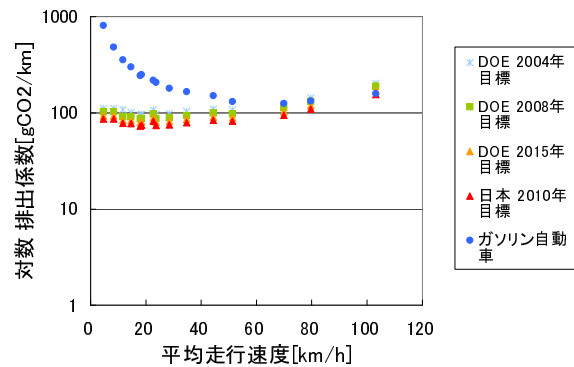


図 6 CO₂ 排出係数の平均速度依存性

4. FCEV 普及のための課題

FCEV 普及のための課題として、1) 車両コストの低減、2) 水素供給インフラの整備、3) 航続距離の増加、4) 水素の価格低下などが挙げられる。これらの課題に対して、消費者がどのような選好を持つか把握し、FCEV の普及にどのような利用形態や施策が有効であるかを条件付ロジットモデルを用いたコンジョイント分析による選好調査で明らかにする。

4.1 条件付ロジットモデル

条件付ロジットモデルでは、各個人は選択可能な選択肢の中から最大の効用を与える選択肢を選ぶという合理的選択行動をとること、そしてその効用は確率的に変動するというランダム効用理論を仮定する。 U_i は選択肢 i を選択した時の効用、 V_i は観測可能な要素 (確定項)、 ε_i は観測不可能な要素 (確率項) とし、効用関数を式 (2) のように設定した時に確率項 ε_i がガンベル分布に従うとすると、プロファイルの選択肢 i を選択する確率 P_i は式 (3) より得られる。

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (2) \quad P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum_{j=1}^N \exp(V_j)} \quad (3)$$

4.2 アンケートの概要

回答者が今後購入を考えている自動車の排気量クラスごとに、クラス平均値を基にして設定したプロファイルに対して水素スタンドの水準ごとに 10 問質問、計 20 問に回答してもらった。排気量クラスは 660cc 超 1500cc 以下、1500cc 超 2000cc 以下、2000cc 超の 3 つを設定した。また、プロファイルの属性と水準として 1) 水素スタンドの普及レベルを現状のガソリンスタンド並または 20 %、2) パワートレインを内燃機関または燃料電池、3) 車両価格を内燃機関ではクラス標準またはその ± 15 %、FCEV では ICE のクラス標準または $+15$ %、4) 航続距離を標準または 75 %、5) 走行費用 (燃料費) を内燃機関ではクラス標準またはその ± 25 %、FCEV ではクラス標準または ± 50 %とした。作製したプロファイルの例を図 7 に示す。

現在のガソリンスタンドの全てに、水素供給設備が導入されたという仮定に基づいてお答えください

Q1-1以下の4つの自動車の中で、あなたが購入しても良いと思う自動車はどれですか。1つを選んで下さい。

<プロフィール1>

	自動車1	自動車2	自動車3	自動車4	この中からは選ばない
パワートレイン	内燃機関	内燃機関	燃料電池	燃料電池	
車両価格(万円)	190	220	190	240	
航続距離	現在のガソリン車	現在のガソリン車	現在のガソリン車	現在のガソリン車	
走行費用(円/km)	7.1	5.4	5.5	2.7	

図 7 プロファイル例

4.3 コンジョイント分析結果

排気量別及び、1500cc 超 2000cc 以下のクラスの水素スタンド整備率による変化を分析した結果、1500cc 超 2000cc 以下のクラスは他の排気量クラスよりも、FCEV への選好が強いことが判明した。また、水素スタンド整備率の低下により、FCEV への選好が弱まる傾向が示された。

表 2 コンジョイント分析結果

属性	660cc超~1500cc以下		1500cc超~2000cc以下				2000cc超~	
	係数	T値	係数	T値	係数	T値	係数	T値
水素スタンド整備率			スタンド整備率100%		スタンド整備率20%		スタンド整備率100%	
燃料電池	0.95	3.36	0.67	4.41	1.11	6.99	0.85	4.35
車両価格(円)	-2.69	-2.83	-0.41	-3.24	-0.51	-4.65	-2.85	-13.39
航続距離	0.03	2.80	0.02	2.95	0.02	3.19	0.02	2.95
走行費用(円/km)	-0.99	-2.18	-0.47	-3.15	-0.44	-3.21	-0.90	-4.40
回答者数	58		220				131	

4.4 FCEV への支払い意思額

FCEV への追加的な支払い意思額の試算を図 3 に示す。試算より、1500cc 超 2000cc 以下のクラスでは FCEV への強い選好を反映して平均車両価格の 2.64~3.17 倍、660cc 超 1500cc 以下・2000cc 超のクラスではハイブリッド自動車とガソリン自動車の価格差と同等の 1.3 倍程度の追加的支払い意思額があることが示された。

表3 FCEV への追加的な支払い意思額

	660cc超～ 1500cc以上	1500cc超～ 2000cc以上	2000cc超～
水素スタンドの整備率	100%	20%	100%
支払い意思額[万円]	45.9	312.2	412.5
クラス平均車両価格[万円]	130.0	190.0	300.0
車両価格増加率	1.35	2.64	3.17

4.5 車種選好モデルとの組み合わせ

コンジョイント分析から得られた SP (Stated Preference) データには市場に存在しない財に対する選好を調査できるというメリットがあるが、その反面、選択バイアスの影響や実際の選択行動を十分に反映していないという欠点がある。そこでコンジョイント分析から得られた消費者の選好を、販売実績と自動車の諸元データに基づいた車種選好モデルと組み合わせることで、これらの欠点を改善し、より信頼性の高い選好調査を行うことが可能となる。

4.6 シェア推定と感度分析

車種選好モデルにコンジョイント分析結果を組み合わせたモデルを用いて FCEV のシェア推定を行った結果を表4に示す。1500cc 超 2000cc 以下の排気量クラスでは、水素スタンドの整備率がシェアに大きな影響を与える一方で、2000cc 超のクラスではあまり影響を受けない事が判明した。

表4 シェア推定結果

		スタンド整備率20%	スタンド整備率100%
1500cc超～ 2000cc以下	推定シェア	4.9%	5.4%
	推定販売台数	75,383	82,111
2000cc超～	推定シェア	0.8%	0.8%
	推定販売台数	12,450	12,941

また、水素価格と FC スタック価格に対する感度分析を行った結果を図8, 図9に示す。分析より、水素価格が 1500cc 超 2000cc 以下のクラスにおける FCEV シェアに大きな影響を与えることがわかった。

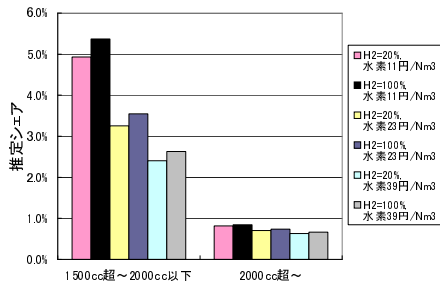


図8 水素価格に対する感度分析

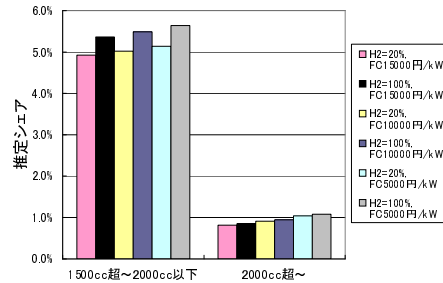


図9 FC スタック価格に対する感度分析

5. FCEV による CO₂ 排出削減と普及に向けて

これらの結果を踏まえて FCEV による CO₂ 排出削減効果の高い地域や利用形態、普及に有効な施策について検討を行った結果、1) 平均走行速度の低い都市圏及び頻繁に発停車を繰り返す路線バスや宅配業務への導入、2) FCEV に対する選好が強い 1500cc 超 2000cc 以下クラスへの導入、3) FC コージェネ導入促進によるスタック価格の習熟効果の実現、4) 安価な水素製造法の開発と水素関連規制の見直しによるスタンド設置数の拡大と設置費用の低減が FCEV による CO₂ 排出削減と普及促進に有効であることが示された。

参考文献

- [1] 工藤祐揮; 運輸部門における都市・地球環境改善のためのハイブリッドトロリーバスに関する研究,(2002).
- [2] 馬場康子, 石谷久; 日本の条件における先端技術自動車の Well to Wheel 総合効率, (2004).