511 未来型都市交通を考慮した燃料電池自動車 “ULFCV(Ultra Lightweight Fuel Cell Vehicle)” の設計および開発

Design and development for fuel cell electric vehicle in consideration of future type city traffic
“ULFCV(Ultra Lightweight Fuel Cell Vehicle)”

正 永田 勝也 (早大理工) 正 納富 信 (早大環境総研) 小野田 弘士 (早大理工)
岩見 武博 (早大理工) ○下築 祐介 (早大理工) 須山 友一 (早大理工)
藤田 貴裕 (早大理工)

Katsuya NAGATA, Waseda University, Ohkubo3-4-1, Shinjuku-ku, Tokyo

Makoto NOHTOMI, ibid.

Hiroshi ONODA, ibid.

Takehiro IWAMI, ibid.

Yusuke SHIMOYANA, ibid.

Tomokazu SUYAMA, ibid.

Takahiro FUJITA, ibid.

Recently, development and the spread are expected of small, lightweight, environmentally-friendly and high-efficiency single-seat fuel cell electric vehicle. Then, in order to realize this concept, we designed and manufactured for ULFCV (Ultra Lightweight Fuel Cell Electric Concept Vehicle) applying the development technology of competition vehicle.

In this paper we researched about the performance of the ULFCV by doing test run. The result, we're able to achieve the cruising range 94.25km by hybrid system (with lead battery). In addition, running in the public road was achieved by acquiring the motorized bicycle number.

Key Words: ULFCV, Fuel Cell Electric Vehicle, Fuel Cell, Capacitor, Hybrid, Motorized Bicycle Number

1. はじめに

近年、小型・軽量で、さらに環境に優しく高効率な一人乗り燃料電池自動車の開発・普及が期待されている。そこで、本研究では、燃料電池競技用車両の開発技術を応用し、実用性も重視した超軽量コンセプトカーULFCV(Ultra Lightweight Fuel Cell Vehicle)の設計および開発を行い、走行試験によって性能の確認を行った。

2. 従来研究

本研究では、以前から競技用車両で得た開発技術をベースとした実用車両 ULV (Ultra Lightweight Vehicle) の開発を行っており、'02 年度に鉛蓄電池をエネルギー源とした新型車両の製作を行った。製作車両の外観を図 1、主要諸元を表 1 に示す¹⁾。

図 1 ULV 車両外観

表 1 ULFCV 車両諸元

全長×全幅×全高	mm	1995×916×1284
車両重量	kg	46
モーター		DC ブラシレス DD (定格出力 70W)
鉛蓄電池		D34YellowTop(Optima 製) (公称容量 55Ah)
空気抵抗係数(Cd)		0.185
前面投影面積(A)	m ²	0.824
シャーシ		CFRP モノコック
乗員数	人	1

3. ULFCV 開発コンセプト

3. 1 目標航続距離の設定

ULV から ULFCV への改良を行うにあたり、燃料電池を搭載し、都内の走行を行うことを目標とした。まず、目標航続距離の選定の手段として、東京都内における交通事情による環境負荷に着目した。

3. 2 東京都内の交通状況調査

ULFCV の最も有効な利用法として、渋滞多発地域での使用を提案することとし、現在の東京都内における渋滞状況を調査した。その結果を表 2 に示す。渋滞の多発する交差点は、環状 7、8 号線圏内に集中し、上位 50 箇所においては 70%、上位 10 位以内においては 80%以上を占めるとわかった。(なお、10 位の交差点が 2 箇所存在している)

表 2 東京都内渋滞発生交差点分布状況 (平成 14 年度)

区域	渋滞発生交差点数	
	上位 50 箇所	上位 10 箇所
環状 7 号線圏内 (環状 7 号線の交差点)	25 (8)	4 (2)
環状 8 号線圏内 (環状 8 号線の交差点)	10 (6)	5 (4)
その他の地域	15	2

3. 3 燃費、CO₂ 排出量の比較

次に、都内の燃費と CO₂ 排出量について調査した。その結果を表 3、4 に示す。渋滞による平均速度低下により、全国平均と比較して燃料損失は約 40%、CO₂ 排出量は約 31% 高いことがわかった(燃費指数とは、40km/h 走行時の燃費を 100 とした場合と比較した指数)。

表 3 地域別の平均速度における燃費指数²⁾

地域	23 区	東京都	全国
平均速度 (混雑時) km/h	18.5	21.0	35.2
燃費指数	67.28	72.56	94.60

表 4 地域別の平均速度における CO₂ 排出量³⁾

地域	23 区	東京都	全国
平均速度 (混雑時) km/h	18.5	21.0	35.2
CO ₂ 排出量 g-C/km	75.20	68.70	51.76

3. 4 目標航続距離の決定

以上の結果を踏まえて目標航続距離を算出した。渋滞は環状 8 号線圏内の半径約 10km に集中しており、またその際の環境負荷も著しい。したがって、環状 8 号線圏内 ULFCV の利用が最も効果的であると考え、そして、カーシェアリング的な利用を行うことを考慮し、1 日 5 人が利用すると仮定した結果、航続距離は 100km と設定することとした。

4. 原動機付自転車のナンバー取得

公道走行を可能とするため、原動機付自転車のナンバーの取得を目指し、各種コンポーネントの取り付けを行った。装着した主なコンポーネントを図 2 に示す。ヘッドライトなどの電気系コンポーネントはすべてホンダ製の原動機付自転車 ZOOMER の部品を使用した。これは消費電力が小さいことに加え、ZOOMER がフレーム構造であるために取り付けが容易であることによる。そして、以上のような改良によって保安基準を満たし、原動機付自転車のナンバー取得することができた。また、燃料電池の搭載に備え、車両側部にエアインターマニホールドの取り付けも行った。完成車両およびナンバーを図 3 に示す。

(a) ヘッドライト (b) ウィンカー (c) テールライト
図 2 各種コンポーネント

図 3 ULFCV 外観

5. 動力系システム

まず、搭載する燃料電池について、図 4 に外観を、表 5 に主要諸元を示す。本燃料電池はパッシブタイプの固体高分子型であり、冷却ファン以外の補機類を必要としない簡単な構造が特徴である。また、競技用車両の開発ノウハウより、高負荷域における燃料電池の著しい電圧降下および効率悪化の対策として、内部抵抗が小さく充放電特性に優れたキャパシタを併用することとした。図 5 に外観を、表 6 に主要諸元を示す。

次に、動力系システムの回路図を図 6 に示す。燃料電池は高負荷を避けるために定電流放電装置を介して平滑キャパシタに充電する形で使用し、大電流放電時に効率よく放電することを目指した。また、登坂時などの出力不足を補うために二次電源としてバッテリーを並列に接続した。キャパシタは 6 個直列に接続し、バッテリーは従来の ULV 同様に Optima 製の D34YellowTop バッテリーを使用した。なお、図 6 中に回生用のキャパシタが接続されてい

るが、今回は回生制動の実施には至らなかった。(システム上は可能である)

図 4 燃料電池外観

図 5 キャパシタ外観

表 5 燃料電池諸元

メーカー	大同メタル工業
出力 W	85
本体寸法 mm	120×60×110
セル数 枚	20
重量 g	2000
水素消費量(最大出力時) ml/min	1100

表 6 キャパシタ諸元

メーカー	日本ケミコン
種類	電気二重層キャパシタ
定格電圧 V	2.5
公称静電容量 F	500
内部抵抗 mΩ	4
重量 g	140

図 6 動力系システム図

6. 走行試験

6. 1 定常走行試験

ULFCV の基本性能を把握するため、定常走行試験を行った。走行試験は片道 800m の平坦な直線の確保できる荒川の河川敷で行った。試験結果のうち、定常走行時の速度と走行抵抗による消費電力の関係を近似曲線とともに図 7 に示す。そして、この近似曲線より車体性能値を算出した。算出結果および航続距離を表 7 に示す。車両重量は、燃料

電池システム、ライト等の取り付けを行ったことで 8kg 程度の増加となった。また、Cd 値もライトやインテークマニホールドなどの装着によって悪化しているといえる。しかし、燃料電池とバッテリーの併用によって全体としての放電効率が向上し、航続距離として 94.25km を得ることができ、目標の航続距離に近い値となった。

なお、ドライバー体重は 70kg とし、搭載した水素は 360NI である。

図 7 定常走行試験結果

表 7 算出車体性能値

車両名	車両総重量 kg	Cd	Cd×A	航続距離 km
'03ULFCV	124	0.185	0.1524	94.25
'02ULV	116	0.145	0.1196	66.00

6. 2 公道走行試験

都市内の交通環境における ULFCV の適応性を把握するため、実際に公道での走行試験を行った。試験コースを図 8 に、試験結果を図 9 に示す。試験コースは早稲田大学理工学部を出発し、明治通り→諏訪通りを経て戸山公園沿いを通り再び大学に戻ってくる全長約 2.2km のコースである。本来ならばもっと長いコースが適当なのだが、都内は坂が多く、ULFCV の登坂性能を考慮すると下図のコースにせざるを得なかった。走行データより図 9 における②の緩やかな上り坂では 300m 加速しても時速 30km/h に到達しなかった。また図中×印で示した最大勾配 4% の地点で信号停止しゼロ発進となった。そこで、心配された登坂性能の低さから、著しく加速が小さくなり後続車の迷惑となったため、手押しで強制加速を行った。現在の ULFCV は、勾配 5% 程度で速度ゼロとなることがシミュレーションで示されていたが、今回の走行試験でそれが証明された。

以上の今回の走行試験を通して、現在の ULFCV における実用化に向けた課題が明らかとなった。それはモーターの出力不足という点である。現状のモーターでは、加速性能、登坂性能が著しく不足している。特に登坂性能に関しては、都内は坂が非常に多いこともあり最大のネックとなる。応急的な対策としては倍電圧装置の取り付けなどによる一時的な出力向上などが考えられるが、モーターに対し過負荷となり、連続運転を行うことは厳しいということから、モーターそのものの高出力化が要求される。また、停車中などにキャパシターからバッテリーに充電が行われるという現象が起こったため、逆電流を防止する方法を検討する必要があることも判明した。

図 8 公道走行コース

図 9 公道走行試験結果

7. ULFCV 実用化に向けたモーター仕様の検討

今回の走行試験で明らかになった ULFCV の実用化に向けて必要となるモーターについて、出力といった仕様の検討を試みた。まず性能目標値の設定を行った。

- 1) 加速性能 (0-30km/h) : 15 秒以下
- 2) 最高速 : 40km 以下
- 3) 最高出力発生領域 : 20km/h 付近
- 4) 登坂性能 (速度 0km/h) : 10% 以上

設定に当たって、車体設計そのものの変更は行わないことから、電源を除く現状のスベックの保持を最優先とした。各目標値達成のためのモーター性能値を最適化した結果を表 9 に示す。そして、定格出力でモーターの最高効率が得られると仮定し、その時のモーター効率を 86% とすると定格出力は 179.5W となった。また、無負荷回転数が 460rpm であることから最高速度は 38km/h という結果が得られ、原動機付自転車としての性能としては十分であるといえる。

表 9 ULFCV 実用化に向けたモーター仕様

最大(制動)トルク	Nm	33
無負荷回転数	rpm	460
最高出力(効率を含まない)	W	398
回転数/トルク勾配	rpm/Nm	13.94

8. 環境負荷の比較

8. 1 環境負荷調査コンセプト

ULFCV の環境負荷について、他の公共機関や内燃機関自

動車との比較を試みた。比較はCO₂排出量によって行った。

8. 2 走行シミュレーション

ULFCV の CO₂ 排出量の算出を行うために走行シミュレーションを行い、100km 走行時の使用電力量、水素消費量を算出した。その結果を表 10 に示す。走行パターンは、全開で 30km/h まで加速、500m 地点で 10km/h 以下まで減速し再度 30km/h まで加速、1km 地点で停止というサイクルを仮定した。また、表のようにシミュレーションは、現行の平行ハイブリッドに加えて、将来的に採用する可能性のあるパートタイムハイブリッド、二次電源を併用しない燃料電池自動車 (PureFCV) に関しても行った。パートタイムハイブリッドでは、加速時はバッテリーとハイブリッドで行い定常走行は燃料電池のみで行うものとした。また、PureFCV は電流上限を 30A とした。使用燃料電池は表のように平行ハイブリッドは 80W を、その他 2 種類の走行法に関しては 180W を用いた。この 180W 燃料電池を実際に所有しているわけではないので、現在所有している燃料電池 2.25 個並列に接続したものを想定した。なお水素消費量に関しては以下の式⁴⁾を用いた。

$$\text{水素消費量(g)} = K \times A \times T \times \text{セル数} \quad (1)$$

$$K = \frac{3600}{F} \times \frac{\text{水素分子量}}{2} \quad (2)$$

K: 化学定数(0.037605) A: 電流(A)

T: 時間(hr) F: ファラデー定数

表 10 100km 走行時の消費エネルギー(その 1)

走行方法		パートタイム ハイブリッド	平行 ハイブリッド
使用燃料電池	W	80	180
消費電力量	Wh	612.7	454.8
水素消費量	g	15.87	28.06

表 10 100km 走行時の消費エネルギー(その 2)

走行方法		PureFCV
使用燃料電池	W	180
消費電力量	Wh	—
水素消費量	g	45.73

8. 3 CO₂ 排出量

以上のデータをもとに ULFCV100km 走行時の CO₂ 排出量を算出した。以下の表 11 に換算条件を表 12 に算出結果をそれぞれ示す。算出に使用した原単位は、今回は JEMAI-LCA⁶⁾より引用した。なお、電力の CO₂ 換算に当たっては東京電力のデータ⁵⁾を使用した。また、今回 CO₂ 原単位は JEMAI-LCA のデータを用いたが、水素製造法、使用電力の内訳により原単位は大きく変化する。そこで、原単位をパラメータとして同様の算出を行った。その結果を図 10 に示す。図 10 より原単位 7.5kg-CO₂/kg-H₂ で現行モデルが最も CO₂ 排出量が小さくなるという結果が得られた。

表 11 環境負荷換算条件

送電効率	%	95
充電効率	%	85
水素輸送効率	%	99
CO ₂ 原単位(東京電力)	kg-CO ₂ /kWh	0.379
CO ₂ 原単位(JEMAI-LCA)	kg-CO ₂ /kg-H ₂	1.347

表 12 100km 走行時の CO₂ 排出量

走行方法	平行 ハイブリッド	パートタイム ハイブリッド	PureFCV
排出量 kg	0.2087	0.1766	0.06098

図 10 CO₂ 排出量の変化 (100km 走行時)

8. 4 他の交通機関との比較

ULFCV の環境負荷を他の交通機関と比較した。比較対照は電車(JR 東日本)と路線バス、一般乗用車⁷⁾である。その結果を表 13 に示す。なお、電車に関しては、使用電力から東京電力の値⁵⁾を用い算出し、各乗車人員は、定員の 80% とした。また、CO₂ 排出量(1)は、交通機関 CO₂ 排出量を乗員 1 人あたりに換算したものであり、(2)は(1)に ULFCV の占有面積を 1 とした場合の面積指数を積算したもので、乗員 1 人あたりのスペースを考慮した CO₂ 排出量である。その結果、CO₂ 排出量(2)より ULFCV の CO₂ 排出量は、電車の 1/3、乗用車の 1/15 以下で、路線バスよりも優れるとわかった。

表 13 CO₂ 排出量の比較結果

車種	CO ₂ 排出量(1) g-CO ₂ /km-人	占有面積 m ² /人	面積指数	CO ₂ 排出量(2) g-CO ₂ /km-人
ULFCV	2.577	1.202	1	2.087
JR	16.31	0.4667	0.3882	6.335
路線バス	7.606	0.4080	0.3390	2.581
プリウス	19.03	1.917	1.595	30.34

9. 結論

本研究により、以下の結論を得た。

- ・ 省エネを追求した超軽量燃料電池自動車 ULFCV を試作し、原動機付自転車のナンバーを取得した結果、公道での走行を実現した。
- ・ ULFCV の実用化に向け、定格出力 180W 程度のモーターが必要であると判明した。
- ・ 燃料電池とバッテリーの併用によって全体の放電効率が向上し、航続距離 94.25km を達成した。
- ・ 様々なモビリティにおける乗員 1 人あたりの CO₂ 排出量を算出した結果、ULFCV が最も優れているとわかった。

参考文献

- 1) 永田ほか 5 名、省電力コンセプトカー “ULV(Ultra Lightweight Vehicle)” の設計および開発、第 13 回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集、(2003.6)、314-317。
- 2) 環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/>
- 3) 日本自動車研究所ホームページ、<http://www.jari.or.jp/>
- 4) 高木武久、燃料電池の使い方、平成 16 年度「電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会」配布資料、(2004.1)
- 5) 東京電力ホームページ、<http://www.tepco.co.jp/>
- 6) 産業環境管理協会、JEMAI-LCA、(2002.12)
- 7) 国土交通省ホームページ、<http://www.mlit.go.jp/>