『ものづくり』教育としての「燃料電池自動車」の設計・製作

Design and Fabrication of Fuel Cell Vehicle Regarding Manufacturing Education

○正 西村一郎（東京電機大学）

鮎沢正太郎（東京電機大学）

Ichiro NISHIMURA, Tokyo Denki University, nisimura@chiba.dendai.ac.jp
Shotaro AYUZAWA, Tokyo Denki University

I do practically with a last purpose that I let a student learn technology and skill to build an "Environment Machine System" in a wider point of view by letting you deal with a design and fabrication of Fuel Cell Vehicle as one example of regarding manufacturing education.

Key Words : Regarding Manufacturing, Fuel Cell Vehicle, Environment, Machine System

1. はじめに

地球上で異常気象が多発している原因として、地球温暖化が問題視されている。地球温暖化の原因の一つに化石燃料を用いる自動車による CO₂ 排出ガスがあり、その問題を解決するために電気自動車や燃料電池車が登場し始めている。東京電機大学の AWS では「ものづくり」を通して環境問題に取り組むべくエコカーの製作を行っており、2005 年に 1kW 級の固体高分子型燃料電池を搭載した電気自動車を設計・製作をした。

2. 設計及びコンセプト

製作した車体は JISFC による走行を行うために国際ソーラーカー規格の ISF4000 に準拠するものとして設計した。以下の項目を満たすような車体を目標とした。

- ・ 軽量かつ高剛性
- ・ 空気抵抗の少ないボディ形状
- ・ 走行安定性能
- ・ 長時間運転可能な快適性能

通常エコカーは走行抵抗を低減すべく、前方投影面積を小さくするが、それではコックピットスペースが狭くなり快適性能が損なわれるため、Hydric Impulse では設計段階でフレームの厚みを十分確保するものとし、サスペンションやステアリングも高速走行に対応できる構造を目指した。設計段階にて製作コストと製作工程の短縮を十分考慮した。

3. Hydric Impulse

車体の外観を図 3. 1 に示す。車体は総重量が 170kg である。車体は重心を低く設定し、カウルもモノコックフレームを覆う必要最小限の大きさに留め、直進安定性を向上させるためホイールベースを長く、トレッドも規格内の 1500mm 幅とサスペンションジオメトリとのバランスを考えできるだけ限り広く設定した。試験走行も兼ねて秋田県の大潟村で開催される燃料電池ジャンボリー・JISFC の燃料電池部門に出場した。2006 年は 3 日間で 800km を完走することが出来た。

図 3. 1 Hydric Impulse

表 3. 1 Hydric Impulse 車体仕様

車両寸法	全長 3400×全幅 1500×全高 1060
ボディ	CFRP モノコックフレーム
乗車定員	1
燃料電池	固体高分子型燃料電池 Nexa 公称出力 1200W 出力電圧 26~42V
水素タンク	タンク容量 3. 0[L] 充填圧力 19. 6[MPa]
蓄電池	鉛(24[V]/24[Ah] 576[Wh])
モータ	永久磁石式モータ 定格 6[kW]
タイヤ	Solar 用 14inch
車体総重量	170[kg]

4. 車体製作

4. 1 CFRP モノコックフレーム

AWS ではフレームに従来アルミを用いたが、今回は軽量の CFRP を用いてモノコックフレームで構成した。フレームを CFRP で構成する際ハニカムを CFRP でサンドウィッチしたパネルを使用すると軽量に仕上がるが、ここではこの製法は断念し、コア材に木材を使用した。使用した木材はファルカタ集成材でバルサよりはやや重いが軽量であり、桐に似

た質感を持ち加工性も良く、比較的大きな素材寸法が入手できるというメリットがある。モノコックフレームは 14mm 厚のファルカタ集成材を CFRP でサンドウィッチしたパネルを作り接着して構成し、樹脂は主にビニルエステル樹脂を使用することでモノコックフレームの製作コストを極力抑えた。構成したいポイントは、木材に無数の切り込みを入れ、曲げ易くしその状態で CFRP でサンドウィッチすることにより曲面形状を実現した。

図 4. 1 CFRP パネルによるフレーム構成

図 4. 2 曲面形状の製法

(a) 木材の切り出し (b) CF の積層
(c) パネルの接着 (d) フレーム完成
図 4. 3 モノコックフレームの成型

4. 2 サスペンション

フロントサスペンションはダブルウィッシュボーンとし、サスストロークによるアライメント変化が少なくなるようにサスペンションジオメトリを決定した。車体は燃料電池や水素タンクを搭載するため制振性も考慮し、ショックアブソーバにはバイク用でストロークの長い減衰調整が可能な物を選択し、バネレートも低めに設定した。校内での走行では 50mm ほどの段差も 50km/h で進入する試験を行ったが、車体は姿勢を保ったまま過大入力を吸収し、コントロールを失わず安定して走行することが確認できた。

4. 3 駆動系及びモータ

モータは十分な加速力と登坂力を得るため出力の

大きいものを選択した。ダイレクトドライブの DC ブラシレスモータが理想であるが、効率は下がるがここでは、DC ブラシタイプのカート用モータを採用し搭載した。また、モータの回転数が高いためチェーン駆動による 1 次減速として、リアのスイングアームに組み込んだ。(図 4. 4)

図 4. 4 駆動系及びリアサスペンション

4. 4 カウル

4. 4. 1 雄型

カウルは、高速走行時の走行抵抗が少ない形状に設計した。雄型は構想に近い形状を実現するために 3 次元 CAD にてモデリングし、断面図を抽出し、骨組み枠を製作し、建築用のブロック状のフォーム材を詰め合わせ、表面を削りその上に不飽和ポリエステル樹脂を塗り重ね研磨した。

(a) 骨組へのフォーム材充填 (b) 表面の研磨
図 4. 5 雄型の製作

4. 4. 2 雌型

雌型は雄型の表面形状を完全に転写する工法で製作した。雄型の表面にガラスマットを張り、寸法精度、耐熱性を考慮し、ビニルエステル樹脂を幾層にも積層した。表面にあたる部分は、硬度が高く表面転写性に優れているビニルエステル系のゲルコート樹脂を使用した。また、中央で分割する割型とすることで離型し易い構造とした。

(a) 雌型の積層・強化 (b) 雌型の製作
図 4. 6 雌型の製作

4. 4. 3 カウルの成型

カウルは軽量に仕上げるためにプリプレグカーボンを使用した。プリプレグカーボンは適量の熱硬化性エポキシ樹脂を含んでおり、80℃の加熱により硬化させた。ウェットレイアップ法とは異なり、適量の樹脂で硬化できるため、全体的に軽量に仕上げら

れるのでメリットがある。

図 4. 7 雌型へのプリプレグカーボン積層

十分に研磨した雌型の表面にプリプレグカーボンを2層に重ね、その上に耐熱ビニールのバキュームバックを被せ真空引きにより型への密着性を高めた。また強度を出すために部分的に発泡アクリル系の軽量なディビニセルをコアとして挿入した。

積層したカウルへの加熱は、簡易的なチャンバによって行った。チャンバはコンパネによる板材で構成し、大型のジェットヒータにより発生させた熱風を送り、温度を上昇させ、5個の温度センサにより温度管理を行い加熱硬化させた。

4. 5 燃料電池

燃料電池は、荏原バード製固体高分子型燃料電池 Nexa を搭載した。Nexa の開放電圧は 42V であり、1200W 負荷時には 26V まで電圧が下がる。燃料は純水素であるために水素タンクも同時に搭載した。

図 4. 8 固体高分子型燃料電池 Nexa

表 4. 1 Nexa の仕様

発電定格出力	1200[W]
水素消費量	18. 5[L/min]
水素供給圧力	0. 07~1. 72[MPa]
供給燃料	純水素
質量	13[kg]

4. 6 電装システム

4. 6. 1 電力系統

電装系統は、Nexa の出力電圧とバッテリーの電圧が異なるため、モータへの電力供給ラインを加速、巡行、充電の走行パターンに応じて、パワーセレクターにより切り替えを行うシステムを構築した。(図 4. 9)

図 4. 9 システム構成図

4. 6. 2 コックピットパネル

コックピットパネルは、ドライバーに車体の状態を把握させるためにコックピット中央に搭載した。表示する情報は Nexa のバッテリー電圧、温度、電流、速度、走行電力でありパネルボードのセンターにアクセル開度 10 段階で示すインジケータを取り付けた。また、Nexa の詳細な状態を波形表示で行う液晶ディスプレイ一体型小型コンピュータを組み込んだ。(図 4. 10)

パネルスイッチ群では Nexa の起動/停止が行えるものとし、充電やモータコントローラの ON/OFF 操作が可能である。走行電力は乗算器 IC によりモータへの入力電圧と電流の積を電圧出力させ DMM にて表示させた。

図 4. 10 コックピットパネル

4. 5. 計測システム

車体の情報はデータログにて記録した。データログは、KEYENCE 製のポータブルデータログ NR-2000 を使用し、バッテリー、燃料電池の電圧や電流、各温度などをサンプリング周期 1 秒にて記録し、各電圧は抵抗にて分圧して入力し、温度は専用 IC を用いて電圧に変換した。速度は後輪軸上に取り付けたロータリエンコーダのパルスをも F/V コンバータにて電圧に変換し、電流は貫通型のホールセンサにより電圧に変換させ NR-2000 に入力した。なお、速度は電圧で読み取れるのでそのままコックピットパネルの DMM に入力し表示させた。

図 4. 11 電装と計測システム

5. 車体性能

図 5. 1 に Hydric Impulse の走行電力と速度の関係を示す。このデータは秋田のスポーツラインでの試験走

行でサンプリングした。結果として低速域での走行電力が大きいのが、原因として図 5. 1 に示すモータの無負荷消費電力が考えられ、モータが高出力であるがゆえに高効率域が電力消費の大きい方にシフトしていることと、ブラシモータなのでブラシによる回転抵抗が大きいなどが挙げられる。

図 5. 1 走行電力と速度の関係

6. 燃料電池 Nexa の特性

6. 1 燃料電池の発電効率

発電効率は以下の式で与えられる。

$$\eta_{FC} = \eta_{theo} \cdot \eta_v \cdot \eta_c \quad (6. 1)$$

η_{FC} : 発電効率 η_{theo} : 理論発電効率 η_v : 電圧効率 η_c : 電流効率
理論発電効率 η_{theo} は、25℃で水素と酸素が反応した場合およそ 83%である。電圧効率 η_v は燃料電池の 1 セルあたりの理論電圧が 1. 229V であり負荷によりセルの起電力が電圧降下(分極作用)を起こすのでそのときの起電力を E として、

$$\eta_v = \frac{E}{1.229} \quad (6. 2)$$

である。また、電流効率 η_c は供給した水素量に対する消費した水素量(燃料利用率)で表される。式 (6. 1)、式 (6. 2) より、発電効率は高負荷による大きな分極作用と燃料利用率の変化により変動する。実際に走行し Nexa に負荷を与えた場合の発電効率と出力電力の関係を図 6. 1 に示す。Nexa 出力電力が増えるほど効率が低下する分布にあるが、500~800W の負荷域では 45~50%の効率を維持し、800~1200W の負荷域では 40~50%の効率を発揮している結果となった。また温度上昇により冷却用のブロワの電力消費が上がるため周辺温度に影響を受けたと推測する。

図 6. 1 Nexa の出力と効率分布

6. 2 巡航速度と燃料電池効率

図 6. 1 の効率分布を元に Hydric Impulse の走行速度と Nexa の効率について図 6. 2 にまとめた。

図 6. 2 走行速度と Nexa 発電効率の関係

図 6.2 より、走行速度が 48km/h 付近から効率が 50% を割り込み、1kW 負荷時の 70km/h 付近で効率が 40% を切る傾向にあった。高速走行域での効率の垂下特性はやや激しくなるので、高効率運転を優先させる速度域は 30~60km/h が最適の結果となった。

7. まとめ及び今後の展望

今回、製作した車体は CFRP モノコックのコア材に木材を使用して製作コストを抑え、なおかつ高速時にも安定した走行が可能であることを試験走行により確かめられた。しかしながら、搭載したモータの効率が低いこと低速走行時の消費電力が大きい結果となった。そのため、今後は高効率 DD モータへの変更も視野に入れ、同時に高電圧のシステム電圧に対応させた昇圧タイプの Nexa 用 DC/DC の開発を進めていく方針である。さらには、ソーラーカーでも発電電力などをマネジメントする必要があるのと同様に、燃料電池車も水素を正確にマネジメントする必要があり、水素残量確認システム等を開発する方針である。

8. おわりに

現在の学生諸君は、「ものづくり」に対する発想、理解、経験等が欠落しており、特に理工系の学生諸君は将来、技術・技能がいかに重要になるかという意味からもこのような実態ある「モノ」の製作を通して教育してゆくことが望まれる。

ここでは、燃料電池車を取り上げたが、現代の社会が望む「エコ」ということも含め、「環境機械システム」として、総合的なシステムを構築できる能力教育をして、「技術者に対する尊敬の念」や「ものづくりへの夢」を持てるようなテーマ等を提供し、技術立国日本の復活に貢献してくれる人材を輩出したい。

文 献

- [1] 解説・燃料電池システム:ジェームス・ラミニ著、オーム社 (2004/10)
- [2] 流体抵抗と流線形: 牧野光雄著、産業図書 (株) (1994/10)
- [3] 自動車の操縦性・安定性: 景山克三著、山海堂 (1992/2)
- [4] エネルギー変換工学: 柳父悟・西川尚男著、東京電機大学出版 (2004/3)
- [5] FRP ボディとその成形法: 浜素紀著、グランプリ出版 (1998/3)