

競技用燃料電池自動車の試作 (第2報)*

— 2007 World Econo Move in 秋田の報告 —

寺尾 裕二¹⁾ 高橋 正則²⁾ 土田 茂雄³⁾

A Trial Model of a Fuel Cell Electric Vehicle

Yuji Terao Masanori Takahashi Shigeo Tsuchida

We mounted the fuel cell on the electric vehicle and participated in a “FC class” competition of “2007 World Econo Move in Akita”. We took various measures about fuel cell operational stability and the electric circuit. The electric vehicle ran 62.3km in two hours.

Key Words : Fuel cell electric vehicle

1. はじめに

現代社会において、化石燃料の大量消費によるエネルギーの枯渇、CO₂の排出による地球温暖化などの環境破壊が、大きな問題となっている。いずれも自動車に関わりの深い問題であり、それを解決する次世代のエネルギー源として燃料電池が注目されている。

固定化されたコジェネレーションシステムでは、既に安定的に電力供給できることが報告されているが、自動車用のエネルギー源としての実用化は、運転状況、負荷変動に対する燃料電池の安定作動、貴金属を使用しているためのコスト面、水素供給の安全面等、課題が山積しているのが現状である。

その燃料電池自動車は、自動車メーカーが開発を競っているレベルの課題であるが、近年は、小型の燃料電池が比較的安価で入手できるようになったことから、我々一般のレベルにおいても、燃料電池自動車の技術を身近に感じられるようになってきた。その一つに小型燃料電池自動車の燃費競技大会がある。

筆者らは、競技用電気自動車に燃料電池を搭載して、World Econo Move in 秋田 (以下WEM) のFCクラス競技 (燃料電池部門) に2004年度大会から出場している。前報においては2005年度大会について報告したが、その後、燃料電池の安定作動と電気回路に関して更に改善を行い、筆者らのチームは2006年、2007年度大会と優勝し2連覇を成し遂げた。

本稿では大会の様態と燃料電池自動車のシステム改善について報告する。

2. 競技の概要

WEMは、燃料電池を電源とする電気自動車による2時間耐久レースで、制限時間内にどれだけ長い距離を走れるかを競うものである。

秋田県南秋田郡大潟村の多目的走行スポーツ施設である「ソーラーズスポーツライン」を会場にして行われ、鉛バッテリーを電源とする競技のほか、2003年大会から、燃料電池を電源とするFCクラスが新設されている。

FCクラスの競技コースは2006年度大会までは全長1.1kmのコースを周回するものであったが、2007年度大会からは、鉛バッテリークラスと混走する形で競技が行われ、図1に示す全長6kmのコースに変更された。

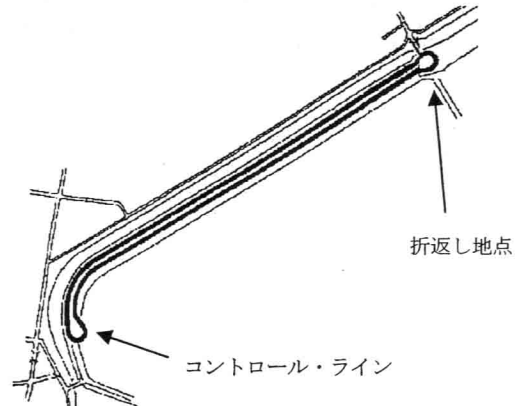


図1 大潟村ソーラーズスポーツライン競技コース

競技は、各車一斉にスタートし、2時間の競技終了後に走行距離を計測する形で行われる。競技規定では、モーターおよび燃料電池の制限はないが、競技車両は全長3.0m、全幅1.2m、全高1.6m以内と定められている。車両重量の制限はないが、ドライバーの重量が70kg未満の場合は、差分のバラストを搭載することが義務付けられている。

競技中は支給された水素吸蔵合金ボンベ(55NL×2本)以外のエネルギー源を使用することはできない。水素吸蔵合金ボンベの外観を図2に、その諸元を表1に示す。



図2 水素吸蔵合金ボンベ

表1 水素ボンベ諸元

品名	水素吸蔵合金ボンベ (大同メタル社製)
容量	60 NL (大会時は 55NL 充填)
圧力	0.5MPa
寸法	Φ50mm×200mm
重量	0.9kg
レギュレータ	調整範囲 0~0.2MPa (SMC 社製)
配管	Φ4mm ポリウレタン

筆者らは、2003 年度大会から基本的に同じ車両を使用して出場しており、燃料電池システムの改良を行ってきた。競技車両の外観を図 2 に、競技車両の諸元を表 1 に示す。

使用した燃料電池は、大同メタル社製の固体高分子型燃料電池 HFC-1275 で、この大会で最も多く使用されている製品である。燃料電池の外観を図 4 に示しその諸元を表 3 に示す。

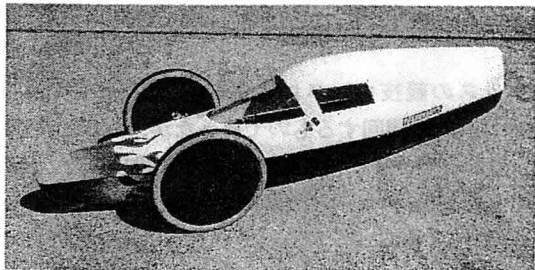


図 3 競技車両

表 2 競技車両諸元

全長×全幅×全高	2540×700×590 mm
ホイールベース	1300 mm
トレッド	650 mm
車両重量	25 kg
フレーム	アルミスペースフレーム
ボディ	FRP
タイヤ	20×1.75
モーター	DC ブラシ (Maxon 社製)
速度制御	PWM 制御
駆動機構	ギヤ + チェーン

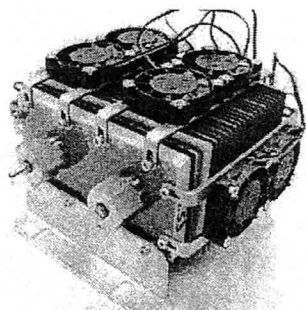


図 4 燃料電池 HFC-1275

表 3 燃料電池諸元

品名	HFC-1275 (大同メタル社製)
定格出力	DC12V / 85W
水素供給圧力	0.07MPa ±0.01MPa
寸法	60×120×110mm
重量	2000 g
使用環境温度	5 ~ 35 °C
送風ファン	1.1W×12 個使用
水素消費量	約 1000 mL/min (85W)

3. 新たな課題と対策

WEM の FC クラスにおいて走行距離を伸ばすには、車両性能を向上させることは勿論であるが、電力損失の低減、燃料電池作動の安定化、電気負荷の分散化が重要であると考え、前報で述べた対策を行ってきた。しかし、対策を行ったところで新たな課題も出てきた。

3.1. 逆流防止回路の改善

この WEM においては、折返し地点での減速及び加速が競技攻略のポイントとなる。

減速時、機械式ブレーキによる制動では、運動エネルギーを熱として消費してしまう。また、ブレーキを使用せず惰性走行を多用して徐々に減速するのでは、エネルギー消費は少ないがラップタイムが短縮しない。この場合、ラップタイムを短縮しようとするならば、巡航速度を上げなければならず、空気抵抗の影響を考慮すると得策とは言い難い。

そこで、筆者らは、減速時に回生制動を用いてエネルギーを電力として回収し、それを加速時の負荷分散に使用する方法とした。具体的には、図 5 に示すように、燃料電池と並列にキャパシタを接続し、減速時の回生エネルギーは昇圧してキャパシタに充電し、加速時には燃料電池の出力と負荷分散する回路とした。

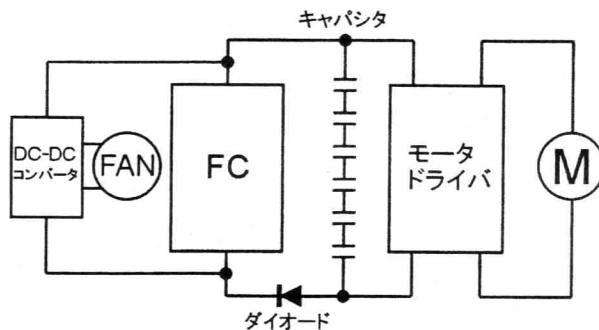


図 5 電気回路

ここで問題となるのは、回生制動時に発生する燃料電池への逆電圧である。燃料電池に逆電流が流れると電解質膜の損傷する可能性があるため、逆電流防止回路が必要となる。

逆電流を防止するには、図中に示すようにダイオードを回路中に入れるのが一般的であるが、ダイオードに順方向電流が流れるときには幾らかの電圧降下が発生する。競技車両での使用に耐えるダイオードの場合、電圧降下量の少ないショットキーバリアダイオードでも約 0.6V の電圧降下が発生する。

競技中の平均電流が約 5A であるため、ダイオードの電圧降下による損失は、およそ 3W となる。燃料電池の平均出力は約 65W であるから、実に 4.6% の損失になる。

2004 年度の WEM 参戦当初より逆電流防止回路としてダイオードを使用してきたが、2006 年度から逆流防止回路の損失低減策として、パワー-MOS-FET とコンプレータによるスイッチング回路を採用した。図 6 にこの基本回路を示す。

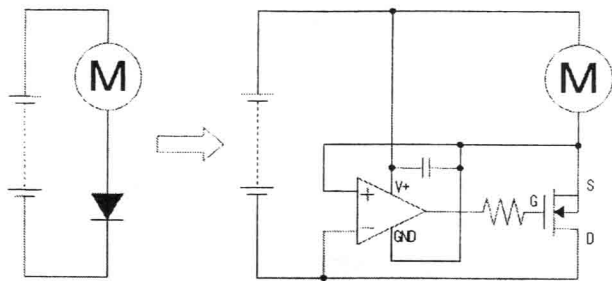


図6 MOS-FETによる逆流防止回路

以下に、その回路について述べる。FETはソース端子とドレイン端子間に寄生ダイオードを持っており、例えばNチャンネルFETの場合はゲート電圧が無い場合でもソースからドレインに向かって電流が流れる。つまり大電流に対応したダイオードの代用としてFETの使用が可能ということである。ただし、このままでは普通にダイオードを使用した場合と同じく電圧降下が発生する。

そこで、ソース～ドレイン間の電圧差をコンパレータで比較し、順方向電圧が加わった場合にゲート電圧を加え、FETをONさせる。このようにFETを作動させることによって、電圧降下はFETのオンソースドレイン抵抗×ドレイン電流で求められる値まで減少させることができる。

実際の回路では、オンソースドレイン抵抗が $5.8\text{m}\Omega$ のFETを4個並列接続しているのので、5A時の電圧降下が約7mV、15A時でも約22mVとなり、大幅に損失を低減することができた。

次は、実際に使用した部品である。

コンパレータは、耐電圧、速度、単電源での使用という点から、NEC製オペアンプ μPC842C を使用した。

パワーMOS-FETは、オンソースドレイン抵抗が小さいFETでは比較的入手が簡単で低価格という点から東芝製2SK2985を使用した。またFETの発熱は無視できるレベルと考えられるが、念のためヒートシンクを取り付けた。実装した逆流防止回路を図7に示す。

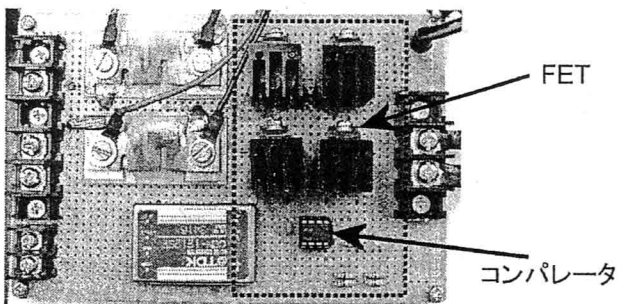


図7 実装した逆流防止回路

3.2. ドライアウト防止

固体高分子型燃料電池では、水素イオンを陰極側から陽極側に運ぶために水が必要となる。つまり電解質膜を適度に湿らせておく必要がある。電解質膜の乾燥は発電不良を起こす

原因となり、これをドライアウトと呼んでいる。

既製品の燃料電池には、酸素供給と冷却の目的で $\Phi 40\text{mm}$ のファン12個が取付けられているが、図8示すように、同程度の風量が得られる消費電力の少ない大型のファン2個の構成に変更をした。

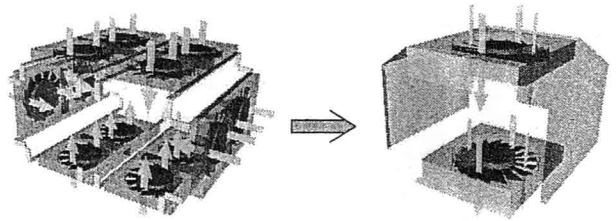


図8 変更したファン構成

この変更により酸素供給と冷却効率が向上し、ファン電力が節減できたが、同時に必要以上の水分蒸発が促進され、ドライアウトを発生し易くなる要因ともなった。そこで、ファン構成の変更はそのままだけにドライアウトを防止するため、燃料電池を加湿することを考えた。

燃料電池の加湿方法は、陽極側の空気又は陰極側の水素を加湿して燃料電池に送り込む方法が考えられるが、密閉状態にある陰極側より開放状態にある陽極側を加湿する方が容易である。しかし、陰極側を加湿する方がドライアウト防止効果は高い。

その理由は、陽極側では発電反応により水が生成されるが、陰極側には生成されない。陰極側の水分は陽極側のそれが回り込むものであり、ドライアウトは主に陰極側に発生するからである。

そこで、比較的簡単に水素を加湿する方法として中空糸膜フィルタを使用した。中空糸膜とは、蒸気選択透過性が高いチューブ状のフッ素系非多孔質膜で、その内外に湿度差がある場合に水蒸気のみが移動する特徴がある。

今回使用した中空糸膜フィルタは旭硝子エンジニアリング社製サンセップSWB-01-100で、その外観を図9に示す。

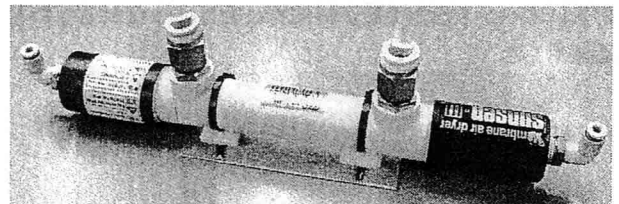


図9 サンセップSWB-01-100

この製品はエアドライヤーとして開発されたもので、中空糸膜に湿潤空気を通して乾燥空気を得るためのものであるが、蒸気出口側を水で満たした状態で使用すれば、中空糸膜の性質により、逆に通過する気体を加湿することが可能である。

中空糸膜フィルタの使用は、電源を使用することなくコンパクトな装置で水素の加湿が可能となった。その水素配管構成を図10に示す。

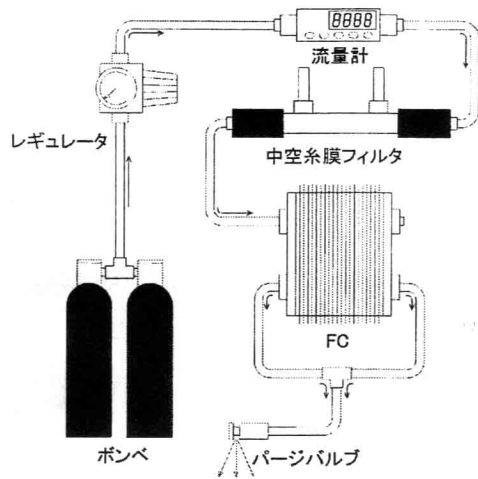


図 10 中空糸膜フィルタを使用した水素配管の構成

加湿のために供給した水の消費量は測定していないが、競技終了後に水が減っていることにより、水素が加湿されていることは確認できる。表 4 は、乾燥した水素が中空糸膜フィルタを通過した場合の湿度を測定した結果である。

表 4 水素流量と湿度の関係

水素流量 L/min	湿度%
0.1	92.75
0.2	92.25
0.3	91.50
0.4	91.25
0.5	91.25
0.6	91.25

3.3. エネルギーマネジメント

2006 年度の車両には、水素消費量を把握できるよう新たに水素流量計を搭載した。これにより競技中の車両状況を知る要素が増え、ペース配分等の作戦変更が容易となった。

図 11 に示す流量計が使用した山武社製 CMS0010 である。計測対象気体、流量レンジ、耐圧、電源電圧等が競技車両に適応し、イベント出力機能が将来的な改良につながるものと考え採用した。

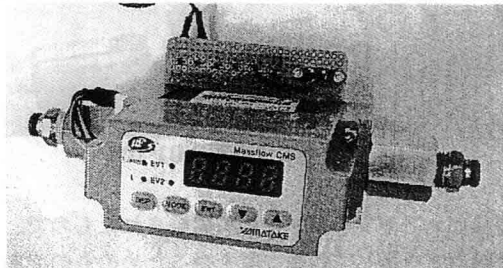


図 11 水素流量計

しかし、センサー部と表示部が一体となっているため、ドライバーの視野に配置すると配管が長くなる欠点がある。

また、表示部に 7 セグメント LED を使用しているため、明るい屋外では全く見えない欠点もあった。

2006 年度大会では、応急的にサンシェイドを作成したが、視認性が悪いため、2007 年度の課題とした。

これら二つの改善をするため図 12 に示すような、新たな表示部を作成し本体と分離して配置した。表示器には、明るい場所での視認性が高い小型液晶ディスプレイを使用し、本体のイベント出力機能から積算パルス出力を受け、これをマイコンでカウントしてディスプレイ表示する方法をとした。

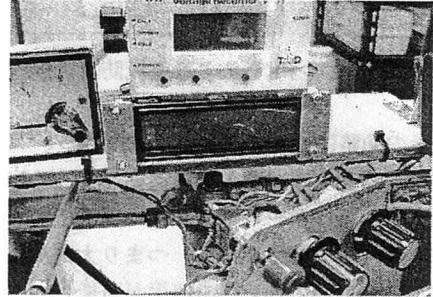


図 12 水素流量表示部

3.4. 車体の補強

2007 年度は懸案としていた車体の補強を試みた。以前から不安要素として考えていたフレームやフロントアクスル支持部の強度不足が、走行抵抗の増加に直接影響があるのではないかと考えたからである。

単純にフレームの補強を行えば、大きな重量増加が避けられないため、GFRP 製のカウルとフレームを接着して一体化することで、モノコックボディのような強度を得られると考えた。ただし、そのまま接着したのではリアアクスル周りのメンテナンスに不都合が生じるため、アンダーカウルを図 13 のように分割化し、リヤ部分を脱着可能とした。

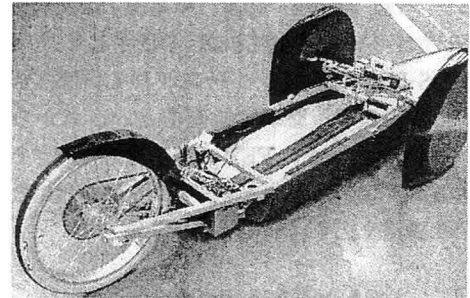


図 13 アンダーカウルの分割化

接着の際、フレームをカーボクロスで包み込むようにしてカウル内面に接着し、フレームとカウルが直接接触しない部位には、カーボンサンドイッチパネルを挟み接合した。また、フレーム接着部のカウル表面にもカーボクロスを貼り付け、カウル自身の強度も向上させた。

フロントアクスル支持部のアルミパイプは、内側にスチールパイプを圧入した二重構造として補強し、走行中のアライメント変化の低減を図った。

4. 大会結果

雨天のサバイバルレースを征して優勝した 2006 年大会に続き、大会 2 連覇が賭かった 2007 年大会を報告する。

2007年度大会は、5月4、5日に行われ、FCクラスには9チームがエントリーをした。WEM・FCクラスのエントリーリストを表5に示す。

表5 FCクラス・エントリー・リスト

No	車名	チーム
201	マンボースマッシュ	中日本自動車短期大学
202	DOROTHY	日産ジーゼル工業株式会社
203	ファラデーマジック	東海大学
204	武蔵EE	武蔵工業大学
205	CHI-BIG	青森職業能力開発短期大学校
206	BLUE FUTURE	大同メタル工業株式会社
211	秋工ファーステックFC	秋田県立秋田工業高等学校
212	颯	秋田工業高等専門学校
214	燃料だー	サレジオ工業高等専門学校

5月4日には公式練習として、決勝レースと同様に2時間の競技が行われた。競技中は、往路走行中に強い追い風となる風向きで、折返しでの回生制動の効きが悪く、復路では向い風で速度が乗らないといった状態であったが、淡々とラップを重ね、2時間62.42kmを走行して1位となった。

5月5日には決勝レースが行われた。穏やかな天候で風も少ない中での競技であった。今大会からは鉛バッテリークラスとの混走であるため、スタートはグリッド中盤からの位置である(図14)。

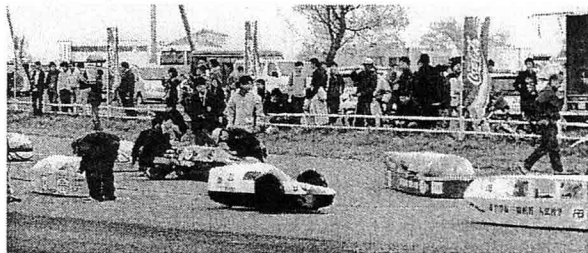


図14 スタート前の様子

競技が開始すると、No.203が序盤からトップを走行し、9分後半～10分前半のラップタイムで周回をした。筆者らのNo.201は、11分台のラップタイムで2位を淡々と周回した。FCクラス上位3チームのラップタイムを図14に示す。

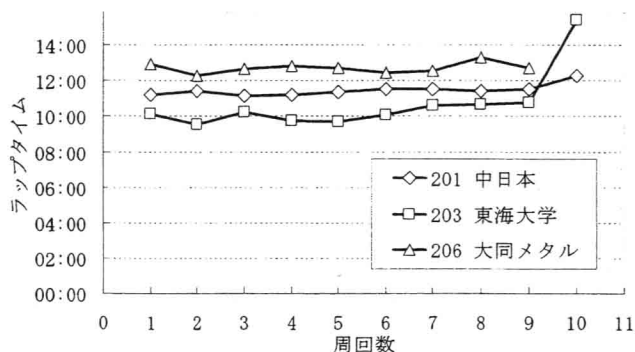


図14 2007WEM決勝のラップタイム

No.203に周回ごと1分以上の差を付けられていたが、筆者らは、前日の公式練習の結果と水素消費量から、走行速度を上げることは難しいと判断して状況を見守るしかなかった。競技時間も残り15分のところで、快調に走行していたNo.203がスローダウンしていることが確認された。筆者らのNo.201は、このまま順調に走行すれば逆転の可能性が出てきた。

しかし、残り5分、ピット前に現れた筆者らのNo.201も水素ボンベ圧低下のためか速度が徐々に低下してきたため、残り時間から追い越せるかどうかといった状況であった。そして、No.203を追いかけピット前を通過していった。

2時間の競技が終了し、筆者らのNo.201はNo.203の1km先で停車していた。逆転優勝となった。決勝レース結果を表6に示す。

表6 決勝レース結果

順位	No.	チーム/車名	距離/消費量
1	201	中日本自動車短期大学 マンボースマッシュ	62,301.21km (96.98NL)
2	203	東海大学 ファラデーマジック	61,350.88km (103.12NL)
3	206	大同メタル工業株式会社 BLUE FUTURE	56,019.80 km (86.79NL)
4	204	武蔵工業大学 武蔵EE	43,674.37km (94.79NL)
5	202	日産ジーゼル工業株式会社 DOROTHY	39,723.00 km (78.01NL)
6	211	秋田県立秋田工業高等学校 秋工ファーステックFC	31,236.93km (101.68NL)
7	205	青森職業能力開発短期大学校 CHI-BIG	28,502.03km (104.57NL)
8	212	秋田工業高等専門学校 颯	16,673.55 km (79.34NL)
9	214	サレジオ工業高等専門学校 燃料だー	3,418.90 km (86.68NL)

5. まとめ

筆者らは、このWEMで2連覇できた要因は、他のチームよりも効率の良い燃料電池システムを構成できたことと、適切なエネルギー管理が行えたことと考えている。

燃料電池システムの更なる改善と車両性能の向上については引き続き研究課題にしたいと思う。



図15 2007年度チームスタッフ

終わりに、本研究にあたっては学生諸君の多大なご協力を得た。2006年度 WEM にてドライバーを務めてくれた北平拓己君、メカニックとして活躍した武藤賢君、安野秀隆君、また、2007年度 WEM にてドライバーを務めてくれた松浦克君、メカニックとして活躍した森正太君、野村裕也君に謝意を表します。また、本稿作成ならびに大会参加にあたり多大なご協力とご理解を頂いた櫻谷興道教授、西側通雄教授をはじめ諸先生方に深謝するとともに、CFRP の技術的なご指導を頂いた佐々木佳久氏、燃料電池の技術的なご指導を頂いた(株)大同メタル工業 高木武久氏に謝意を表します。また、「財団法人 東京自動車技術普及協会」の助成を頂きましたことを記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋正則, 神谷伶, 竹田修一郎, 渡慶次直, 仲野淳史, 川島尚也, 三浦貴志: FRP による省エネ EV 用カウリングの試作, 中日本自動車短期大学論叢, 第 31 号, 2001, p.37-42.
- 2) 高橋正則: 電気自動車用電源回路の一考察, 自動車整備に関する研究報告誌, 第 30 号, 2001, p.46-49.
- 3) 高橋正則: 2002 World Econo Move in Akita の報告, 中日本自動車短期大学論叢, 第 33 号, 2003, p.49-55.
- 4) 高橋正則, 土田茂雄: 燃料電池自動車の試作, 中日本自動車短期大学論叢, 第 34 号, 2004, p.53-61.
- 5) 高橋正則, 土田茂雄: 2004 WEM in 秋田の報告, 中日本自動車短期大学論叢, 第 35 号, 2005, p.39-47.
- 6) 高橋正則, 寺尾裕二, 土田茂雄: 競技用燃料電池自動車の試作, 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第 34 号, 2005, p9-14