



小型電気自動車のための CFRP ボディと 車両制御の融合技術開発

林 憲玉* 竹村 兼一* 山崎 徹*
中村 弘毅** 加藤木 秀章** 高山 英一***

Development of Vehicle Control and CFRP Chassis for Micro Electric Vehicles

Hun-Ok LIM* Kenichi TAKEMURA* Toru YAMAZAKI*
Hiroyuki NAKAMURA** Hideaki KATO** Eiichi TAKAYAMA***

1. はじめに

近年、様々な電気自動車(Electric Vehicle: EV)が市場に普及しつつある。EV は内燃機関自動車と比較し、車両を構成する部品点数が少なく、排気ガスを車両から排出しないため環境負荷が小さい。また、電気モータはトルク応答が内燃機関に比べて速いため、発生したトルクを高速かつ正確に制御でき、自動運転などの車両制御技術が応用しやすい。しかし、航続距離は内燃機関自動車に劣り、充電にかかる時間が長いなどの課題があるため、一度の走行が短い都市交通への応用がより適していると考えられる。

このような背景から EV の中でも、近距離、短時間での使用に限定した 1 人から 2 人乗りの新しい移動手段として小型 EV(Micro Electric Vehicle: MEV)が注目されている。一般生活における車での一日当たりの移動距離は、約 6 割が半径 10km 圏内となっており、車両に搭乗する人数も 2 人以下が大半を占めている。また、国土交通省は軽自動車より小型で 1 人もしくは 2 人乗りの自動車の新たな車両規格の導入を決定⁽¹⁾している。

しかしながら、小型電気自動車普及を妨げる障害が数多く存在する。まず、軽自動車よりも小さな車体であるため、衝突に弱い。車体の小型軽量化と高剛性化を両立するためには複合材料などの新素材の利用が必要不可欠である。キャビンに比強度及び比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いることで、軽量かつ高い安全性を有する小型電気自動車を製作することが可能になると期待されて

いるが、キャビンに用いる CFRP と車体を構成するチューブラーフレーム構造の金属部材を接合することができる部材を開発する必要がある。

また、自動車は一般的にホイールベースやトレッドを長くすることで安定化し、短くすることで小回りが利く。そのため、小型自動車は都市部において小回りが利くといった利点がある一方で、姿勢が不安定になりやすく、ピッチングやローリング振動が発生しやすい。しかし、電気モータの即応性を利用した姿勢安定化制御によってこれらの振動を抑えることが期待できる。

さらに、車両を小型化することによって冗長性が少なくなり、利用範囲が限定されてしまうことも生産性の点からは問題となる。MEV の用途としては、手軽さを活かして主婦や高齢者の買い物や送迎や、省スペースで小回りが利くことを活かした配達など業務での使用、観光地での観光客の移動手段、カーシェアリングなどが想定される。これらの需要に対応するためにはベースのプラットフォームは共有しながら目的ごとにバリエーションが必要である。つまり、低コストで設計変更が容易な構造で小ロット多品種生産を実現することが望まれる。

現在市販されている電気自動車開発は、制御システム設計における明確なプラットフォームが存在しないため、開発の手法や手順は各企業の裁量に任されている。そのため、大学など外部の機関や一般人が制御システムに変更・改良を施すことは困難である。そこで、制御プログラムを一定の範囲に分けてモジュール化することにより、複数の制御プログラムの統合・開発を容易にする「汎用制御プラットフォーム」を考案する。

このように、小型電気自動車が普及するにはクリアすべき課題がいくつかある。そこで、本研究では車両の定員 2

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助手 機械工学科

Research associate, Dept. of Mechanical Engineering

*** 高山自動車

Takayama car

人まで、半径 10km 以内の短距離走行を想定した小型電気自動車の開発を目的とする。しかし、前述のようにクリアすべき課題がいくつかあるため、各研究室の特長を活かしてそれぞれの課題に取り組む。

本報では、小型電気自動車開発のための要素技術研究として以下の 5 点について報告する。

- 1) 制御モジュール構築
- 2) 車両ピッチング制御に関する検討
- 3) CFRP と金属部材を接合可能な部材の設計・製作・評価
- 4) 小型自動車の試作プラットフォーム製作
- 5) 学生フォーミュラ車両製作を通じた学生の実践的ものづくり能力の向上

はじめに、本姿勢安定化制御則を単一の制御用モジュールとして汎用制御プラットフォームの一部に組み込み、本プラットフォームの有用性を示す。そして、模型車両を用いた走行実験を行い、ピッチング振動の抑制効果について検討する。次に、CFRP を用いた MEV を開発するため、CFRP と車体を構成するチューブラーフレーム構造の金属部材を接合することができる部材を設計製作し、その性能について評価を行う。また、提案した需要に即した MEV の試作機を設計し、企業と連携してその製作を進める。

さらに、学生の実践的ものづくり能力向上のために行った、学生フォーミュラ車両製作に関する取り組みについて報告する。

2. 制御用モジュール構築

車両制御の統合・開発を容易にするための汎用制御プラットフォームを考案する。その汎用制御プラットフォームの概要を図 1 に示す。ハードウェア入出力に関連する部分とそうでない部分を切り分けることで、センサ等ハードウェアの交換・追加を容易にする。ハードウェア入出力に関連しない部分を役割に応じて 3 段階に分割する。

入出力に関連しない 3 つの制御モジュールの詳細を以下に述べる。一つ目は走行環境モジュールである。このモジュールでは、車両周辺の状況を考慮した上で車両の行動を決定するための役割を担う。ドライバーが運転する車両だけでなく、周囲を走行している別の車両や障害物に基づいた制御を行う。二つ目は車両全体の状態を制御するためのモジュールである。走行環境モジュールから出力された車両周辺の状態から、必要と判断した車両の推進力を実現しつつ車両を制御するのに必要なトルクを出力する。トラクション制御などはこれに該当する。三つ目はモータ・電動パワーステアリング・ブレーキなど機構のモデルに基づいた制御モジュールである。車両全体を制御するため、指示されたタイヤ軸

トルクを発生させるのに必要なモータトルクを機構のモデルベース制御により算出し、動力のモータに送る。

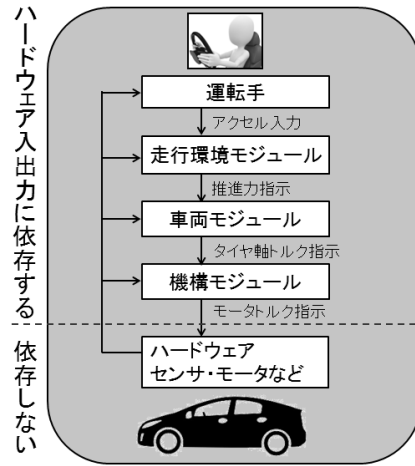


図 1 汎用制御プラットフォーム概要図

以上の三種類のモジュールで汎用制御プラットフォームが構成される。三種類のモジュールの中で、車両モジュールに姿勢安定化制御を組み込み、次節で詳しく説明する。

3. 車両のピッチング制御に関する検討

ここでは、ホイールベースの短い車両の問題点の一つであるピッチング振動について、駆動モータによる制御を行いその有効性を検討する。

3.1 車両姿勢安定化制御モデル

最適レギュレータを用いて走行中に発生するピッチング振動を抑制する。自動車を安定化させるために、図 2 のような自動車モデルを考え、状態空間方程式を組み立てる。モデルの状態方程式を式(1)と(2)に示す。式(1)の左辺は重心点の垂直方向の変位と速度、ピッチ軸周りの角度と角速度から構成される 4 次元の状態変数である。また入力にはタイヤ軸でのトルク T を意味する。

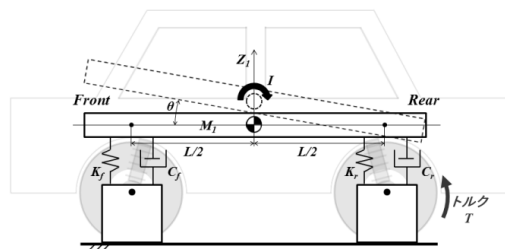


図 2 自動車モデル

$$\begin{bmatrix} \ddot{Z} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0}{K_f + K_r} & \frac{1}{M} & \frac{0}{-L} & \frac{0}{-L} \\ -\frac{K_f + K_r}{M} & \frac{C_f + C_r}{M} & \frac{0}{2M} & \frac{0}{2M} \\ -\frac{0}{L} & \frac{0}{L} & \frac{0}{2I} & \frac{0}{2I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ z \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T \quad (2)$$

これらを基に最適レギュレータを用いてコントローラを設計する。状態変数と入力との両者のバランスをとるために評価関数 J を用い、状態変数と入力にかかっている行列 Q と R をそれぞれ調整する。行列 Q は 4 次元の対角行列である。行列 R は入力の次元と同じに 1 次元である。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (3)$$

制御システムはフィードバック制御を用いない、最適レギュレータのみを使用した開ループ型のフィードフォワード制御である。制御システムを図 3 に示す。そして走行時に発生した状態変数の変化は加速度センサとジャイロセンサで検出し、評価に用いる。

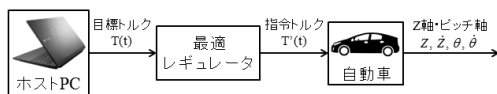


図 3 姿勢安定化制御システム

3.2 移動ロボットを用いた実験

ピッチング制御の有効性を示すためモータを動力とする移動ロボットを製作し実験を行った。移動ロボットの外観を図 4 に示す。

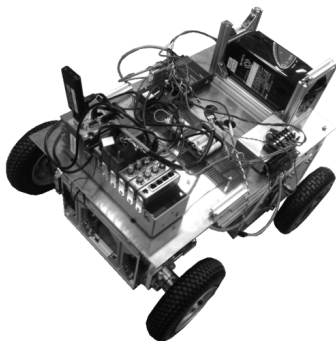


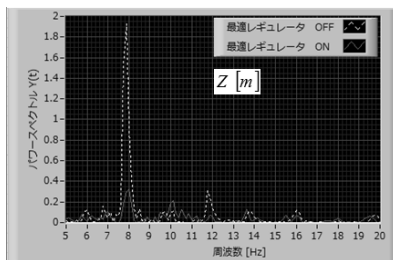
図 4 自走行ロボットの外観

機体はアルミフレームで構成されている。駆動には、左右の後輪一つずつ搭載しているブラシレス DC モータを使用している。ステアリングには、サーボモータを使用し、ラックとピニオンを介して前輪を操舵する。またサスペンションは適しているものが入手できなかったため、ばねとダンパーの両方の性質を持つ、サミニ社製の「防振ダンパーばね」を使用した。センサやコントローラ、バッテリーなどのハードウェアを搭載したアルミ板の四方に防振ダンパーばねを装着する事で、自動車のサスペンションの機能を再現している。この防振ダンパーばねを用いたサスペンションは、実際の自動車と構造が異なるが、モデル上は第 3.1 節で導出した自動車モデルと同様である。制御用ハードウェアには、実際の小型電気自動車にも搭載可能な、日本ナショナルインスツルメンツ社の CompactRIO と LabVIEW を使用する。パソコンにルータを接続し、CompactRIO に接続された無線 LAN 子機と無線通信を行って制御する。アクチュエータやセンサ等の入出力には CompactRIO に付随する A/D コンバータや D/A コンバータ、DIO 等を使用する。

姿勢安定化制御の有用性を検証するために、直線走行における姿勢安定化制御実験を行う。ステップ状の指令トルクを入力として与えた際、姿勢安定化制御を用いた時と用いない時に生じる振動の比較を行う。

3.3 姿勢安定化制御実験

実験では、状態変数を構成する Z 軸方向の変位と速度、ピッチ軸周りの角度と角速度を検出した。その値に高速フーリエ変換を施してパワースペクトルにまとめた。それぞれの状態変数のパワースペクトルを図 5(a)~(d) に示す。4 つの状態変数の変化が、最適レギュレータの効果によって抑えられているのがグラフから読み取れる。また、モデルから算出した状態変数のゲイン線図を図 6 に示す。4 つの状態変数のゲイン応答のピークが、大体 10[Hz] 付近に集中しているのがわかる。図 8 の状態変数のパワースペクトルと比較すると、実際の状態変数の変化も 8[Hz] 付近に集中しているため、任意の周波数帯の変位を最適レギュレータで抑制できている事が確認できる。



(1) Z 軸変位

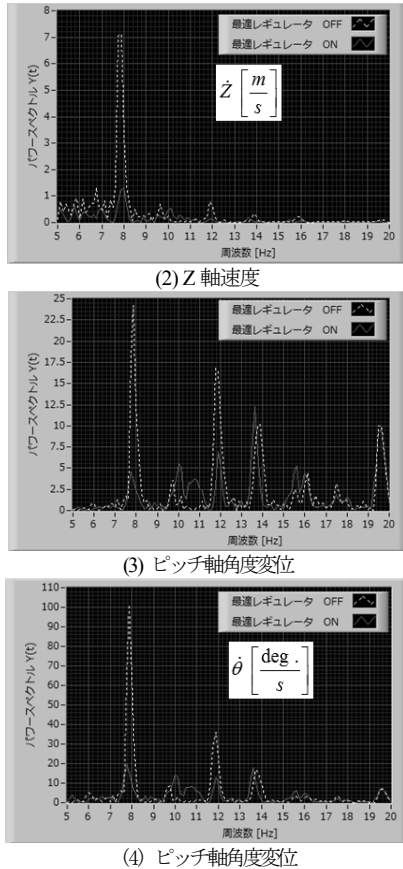


図 5 状態変数のパワースペクトル

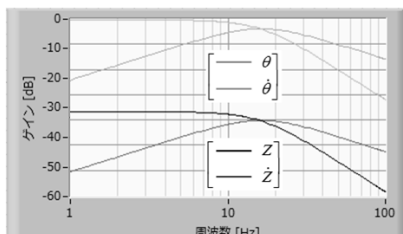


図 6 状態変数 x のゲイン線図

4. CFRP と金属材料を接合可能な部材の設計・評価

自動車などの機械製品に軽量高剛性な CFRP を利用する場合、金属材料と CFRP の接合方法、その強度が問題になる。提案する小型電気自動車用車体フレーム(図 7 参照)にも軽量化のため CFRP を活用し、また部品によっては金属材料が用いられる。そこで、接合部材の設計・製作・評価を行った。車体総重量は 750kg、前面部の接合箇所は 6 箇所を想定する。なお、設計には SolidWorks 2010 を用いた。設計した接合部材を図 8 に示す。丸パイプ(S45C)と接合部品(S50C)は溶接し、接合部品と角パイプ(CFRP)はボルト接

合する。

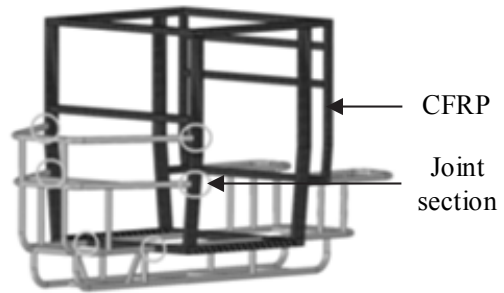


図 7 EV 用車体フレーム

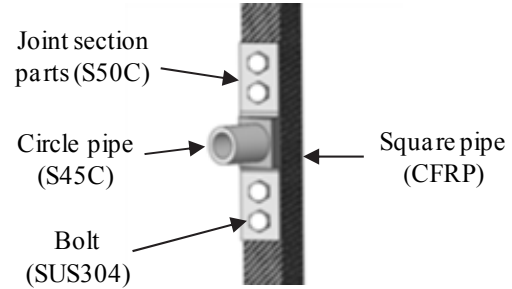


図 8 接合箇所

4.1 接合部材の解析方法

4.1.1 使用要素及び物性値

本研究では、汎用有限要素法解析ソフト ANSYS 14.0 を用いて解析を行った。要素は 3 次元要素 Solid186(6 面体形状、20 節点)とした。節点数は 185584、要素数は 114420 である。接合部材に用いる材料の物性値を表 1^{(2),(3)}に示す。繊維体積含有率は 45%とした。

表 1 CFRP 及び金属材料の物性値

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Shear modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Failure strain (%)
CFRP	E_X 65.3	ν_{XY} 0.3	G_{XY} 12.1	σ_X 502		1.78
	E_Y 16	ν_{YZ} 0.3	G_{YZ} 12.1	σ_Y 82.4		
	E_Z 65.3	ν_{XZ} 0.1	G_{XZ} 49.5	σ_Z 502		
S45C	202	0.3	202	570	345	20
S50C	206	0.3	206	608	363	18
SUS304	197	0.3	197	480	255	40

4.1.2 境界条件

境界条件を図 9 に示す。拘束条件は角パイプ両端の断面を選択し、Z 軸を中心とした回転自由度以外すべて拘束した。荷重を算出する際、式(4)を用いた。荷重条件は丸パイプ断面に垂直な荷重を 8680N 負荷させた。

$$F = \frac{M \times V}{S \times N} \quad (4)$$

F : 荷重, M : 質量 750kg, V : 衝突速度 50km/h,
 S : 衝突時間 0.2s, N : 接合箇所

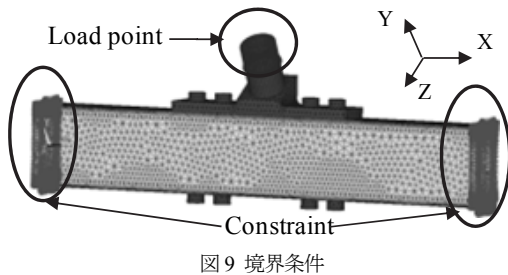


図9 境界条件

4.2 解析結果

CFRP 製角パイプと金属部材をボルト接合させた部材の相当応力分布を図 10 に示す。接合部材の最大相当応力は 78.9MPa であり、構成材料である S50C の降伏応力の 22% 程度であった。

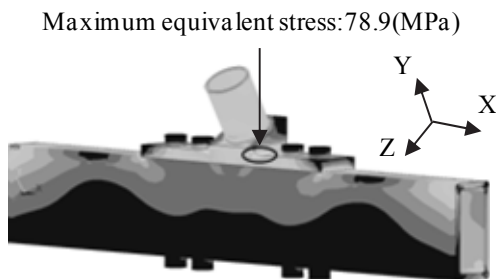


図 10 相当応力分布

4.3 接合部材の製作と荷重試験

CFRP 製角パイプを成形する際、型を用いてハンドレイアップ法により成形した。成形条件として、成形温度は 90℃、成形時間は 3hrs とした。CFRP 製角パイプの寸法は外径は縦 80mm、横 40mm、内径は縦 66mm、横 26mm、長さは 460mm とした。成形した CFRP の重量は 820g、繊維体積含有率は 41% であった。

CFRP 製角パイプと金属部材をボルト接合させた部材(図 11 参照)を用いて、荷重試験を行った。

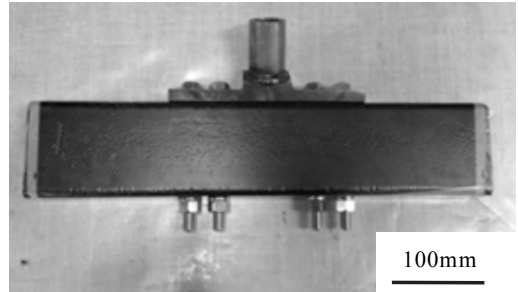


図 11 接合部材

試験本数は 2 本とし、クロスヘッドスピードは 0.1mm/min、試験荷重は 8680N とした。また、試験荷重に到達後、1 分間荷重を保持した。作製した接合部材の荷重－変位線図を図 12 に示す。8680N を 1 分間負荷させた場合、接合部材は破壊せず、ボルト接合が可能な部材を作製することができた。

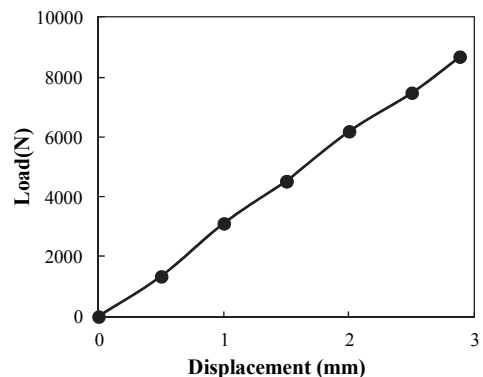


図 12 荷重－変位線図

5. 小型電気自動車試作車 105 型の開発

5.1 試作車両概要

本研究において製作した小型電気自動車「105 型」の外観を図 13 に、仕様を表 2 に示す。



図 13 小型電気自動車 (105 型)

シャシの設計方法には、製作が容易で安価かつ汎用性に優れたフレーム構造を採用した。動力には三相ブラシレス DC モータを使用する。駆動方式は、モータから出力された動力をディファレンシャルギアとドライブシャフトを介して後輪に伝達する方式を採用している。制御には、National Instruments 社の CompactRIO をハードウェアに、付随する同社のグラフィカル言語 LabVIEW をソフトウェアに使用する。

表 2 105 型の主な仕様

全長	2490[mm]
幅	1290[mm]
高さ	1680[mm]
ホイールベース	1730[mm]
車両重量	450[Kg]
最高速度	60[km/h]
駆動方式	MR 方式 (Mid-motor Rear-drive)
サスペンション	ストラット式
ブレーキ	前輪 ディスクブレーキ
	後輪 ドラムブレーキ
モータ	DC ブラシレスモータ
バッテリー	鉛蓄電池 12V/42Ah×6
	鉛蓄電池 12V/28Ah×1

5.2 車体 (ボディ)

車体の構造は衝突に耐えることができ、小規模な工場での製作を考慮した結果、鋼管を組み合わせて車体を構成するチューブラーフレーム構造を採用した。溶接ロボットやプレス加工などが使えないため大量生産には向かないが、溶接機やパイプ加工機といった簡易な製造設備で製作でき、車体重量で高い剛性・強度を持たせることができる。

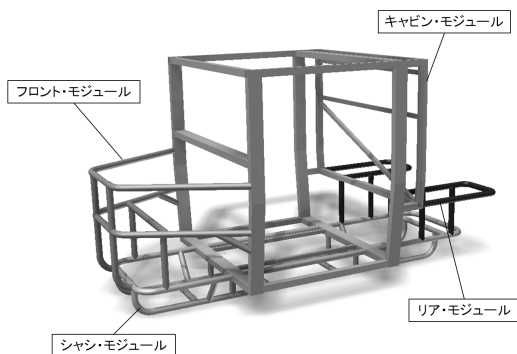


図 14 車体を構成するモジュール

また、少量多品種生産を容易にするためにモジュール毎に分割して設計を行える構成とした。この車両は図 14 のようにシャシ・フレーム・フロント・キャビン・リアの四つのモジュールに分けて設計を行っている。そのため、設計変更やモデルチェンジを行う際に変更が必要なモジュールのみを設計することで用途に応じた車両フレームの開発が可能となっている。

5.3 シャシ

シャシの構造を図 15 に示す。シャシはモータやバッテリーなどの駆動部品を収め、車両特性を決める重要な部分である。そのため、特に汎用性が求められる部分であり、シャシを共通化することでモデル展開を行う際に、開発期間と製作時間の大幅な短縮や生産数の増加によるコストの低減が可能になる。

今回設計した小型電気自動車では、シャシ上部をフラットに保つことで、車種展開の際にキャビン・フロント・リアモジュール設計を制約しないように考慮した。また、重心を下げるために、モータやディファレンシャルギア、バッテリーなどの重量のある機器をシャシフレーム内に配置した。また、車両重量の半分近くを占めるモータとバッテリーを車体中央に配置することで、車体の安定性の向上を図った。

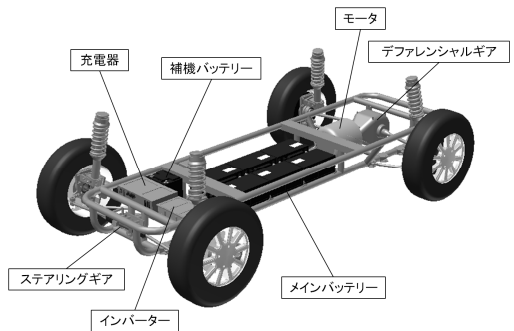


図 15 シャシの構造

6. 学生の実践的なものづくり能力の向上

本研究のような車両開発はアイデアだけでなくそれを実現する製作技術、あるいはその両者をつなぐ実践的な能力が必要不可欠である。しかし、最近の工学系大学では、実習や設計・製図などのカリキュラムが減少しており、欧米に比べ、ものづくりの機会が不足している。今回の研究においても試作車両は外注して製作しているが、車両の完成は業者に依存してしまい、また設計変更などを反映するには時間とコストがかかる。そこで、学生のものづくりの経験値を高めることで今後の研究を円滑に進めるべく、学生フォーミュラの EV 車両を題材とし、設計・製作を行った。

6.1 学生フォーミュラ大会概要

学生自らがチームを組み約 1 年間で 1 人乗り小型レーシングカーを開発・製作することによって、学生がものづくりの本質やそのプロセスを学び、ものづくりの厳しさ・おもしろさ・喜びを実

感することを目的としている。年に1度開催される全日本大会では、走行性能だけでなく、車両のマーケティング、企画・設計・製作、コスト等のものづくりにおける総合力を競う。米国ではものづくり実践教育の場として1981年から大会が開催され、日本でも米国「Formula SAE®」のルールに準拠し、2003年から全日本学生フォーミュラ大会を開催している⁽⁴⁾。

6.2 車両製作の概要

設計については鋼製パイプの溶接によるフレーム構造など、前章で提案した車両と共通点が多くあるため、ここでは主に加工について述べる。フレーム構造の溶接は専門の企業の方の指導を受けて行った(図16参照)。溶接のずみの発生しにくいトラスの組み方など、設計時点でも考慮すべき点についても指導を受けた。



図16 フレーム製作の様子(溶接作業)

駆動系を含む電気系統の配線については、電気電子情報工学専攻の大学院生が主体となって設計製作を行った(図17参照)。電気自動車は高電圧・高電流を取り扱うため設計や作業中に留意すべき点が多く、Formula SAE®のルールに書かれた安全基準や、電気車検担当の審査員の指導に従って製作を進めた。

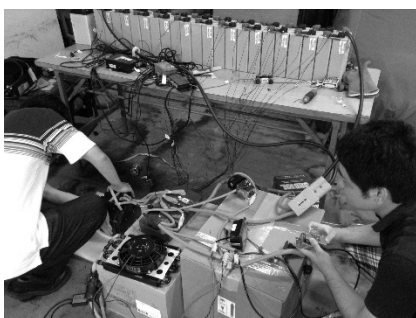


図17 駆動配線確認

予定から大幅に遅れたものの完成した車両を図18に示す。設計・製作において多くのことを学んだ一方で、工程管理の拙さなど、改善すべき点も多く、それについては今後の活動で検討すべき課題である。学生フォーミュラの活動についてはテクノサークルとしても継続予定であり、本年度の課題については来年以降の活動で改善していく。



図18 完成車両外観

7. まとめおよび今後の展望

車両制御の統合・開発を容易にするための汎用制御プラットフォームも開発し、そのプラットフォームには、姿勢安定化制御則を組み込んだ。モータを動力とする自律走行ロボットを利用した走行実験により、姿勢安定化則の有効性が確認できた。

また、小型電気自動車のキャビンに用いるCFRP製角パイプと金属部材のボルト接合可能な部材を設計・評価し、接合部材の開発を行った。その結果、設計した部材の相当応力は構成材料であるS50Cの降伏応力の22%程度であった。また、作製した接合部材に8680Nを1分間負荷させた場合では破壊せず、ボルト接合が可能な部材を作製することができた。

1~2人乗りのMEV試作車両「105型」の設計開発を行った。外注部品製作の遅れにより現時点で車両は完成していないが、車両が納入され次第、走行実験を行う。

学生フォーミュラ大会仕様の車両設計・製作を通じて学生のものづくりに対する理解を深めることができた。工程管理など今後改善すべき課題があるものの、1台の電気自動車を走行可能な状態にまで自作したことで、設計から製作に至る過程で注意すべき点などに気づくことができ、今後の研究に役立てられることが期待できる。

参考文献

- (1) 加藤敦宣, 社会イノベーション研究 Vol.7, (2012-2), p.29.
- (2) 足立廣正, 長谷川照夫, 日本複合材料学会誌 Vol.30, (2004-3), p.120.
- (3) 山部昌, 小森昌宏, 日本設計工学会北陸支部研究発表会論文集, (2007), p.21.
- (4) 全日本学生フォーミュラ大会ホームページ <http://www.jsae.or.jp/formula/jp/> (2014年10月16日アクセス)