

エネルギーキャリア実験用ハイブリッド・ソーラーカー

”S-Mg concept”の開発

Development of Hybrid Solar-Car “S-Mg concept” for Energy Carrier Experiments

斉藤純*, 小原宏之**

Jun Saitoh* and Hiroyuki Obara **

*玉川大学工学部エンジニアリングデザイン学科, 194-8610 東京都町田市玉川学園6-1-1

**玉川大学TSCP, 194-8610 東京都町田市玉川学園6-1-1

*Department of Engineer Design, College of Engineering, Tamagawa University,

6-1-1 Tamagawagakuen Machida-shi Tokyo 194-8610

** TSCP, College of Engineering, Tamagawa University,

6-1-1 Tamagawagakuen Machida-shi Tokyo 194-8610

Abstract

The use of energy carriers is considered an effective way to help solve environmental and energy problems. Magnesium is universally present on the earth and can be a reusable energy carrier. In our research on the use of magnesium as fuel, we have developed a hybrid system that combines a solar cell and a mechanically rechargeable magnesium air battery. We have developed a hybrid solar-car for onboard testing of this system. This paper describes the design and manufacturing process of hybrid solar-car “S-Mg concept” and the fabrication method we have introduced to make the CFRP parts.

Keywords: magnesium-air battery, photovoltaic, hybrid solar-car, CFRP, PBL

1. はじめに

金属-空気電池の二次電池の研究が行われる中、現時点では正極・負極ともに可逆性が不十分であり一次電池での利用が主となる。本研究では電極を差し替えることで実質的な充電とするメカニカル充電方式のマグネシウム空気電池システムを開発している。本システムは離島や遠隔地、災害時などでも送電網に依らずマグネシウムを燃料にしたインフラとしての利用が見込まれる。

これを可搬型にしてマグネシウム空気電池を電源とした電気自動車やハイブリッド・ソーラーカーの実証試験を行っている^{1),2),3)}。これらの車両

で用いるマグネシウム空気電池のセル数はシステム電圧への昇圧を考慮して32直列で構成される。マグネシウムの燃料利用を検証するにはセル数が少ないほうが電池や関連システムの試作・試験・改良サイクルを短くできる。そこで、エネルギーキャリアをテーマにしたPBL(Project Based Learning)で、少ないセル数のマグネシウム空気電池で走行できる小型実験車両『S-Mg concept』を開発した(図1)。車両名は、再生可能エネルギーのSolarとエネルギーキャリアのMagnesiumの燃料利用を組み合わせる電力を安定供給して走行するコンセプトモデルである意を持つ。



図1 ハイブリッド・ソーラーカー ”S-Mg concept”

TSCP(Tamagawa Sustainable Chemistry-powered vehicle Project)でこれまでに開発してきた競技用ソーラーカーは空力性能と発電性能の両立を目指して性能を特化した設計であった。ハイブリッド・ソーラーカー『未来叶い』は、実験プラットフォームであることに加えて実用車に寄せて2名の乗員の居住環境と低消費エネルギー性能の両立を目指す設計であった。新しく開発するハイブリッド・ソーラーカー『S-Mg concept』は、実験車両であるが新しいモビリティへの高揚感を呼び起こすプレゼンスのある外観と車両性能の両立を目指すことを指針として設計した。

本稿では、「S-Mg concept」の車体の構造や関連部品製作のために新しく導入した製法、設計製作過程を報告する。

2. 車体構造

車体は図2に示すように走行機構と電装システムを有するシャーシと空気抵抗低減のためのカウルで構成される。省電力電気自動車の競技のレギュレーションを参考に車両の全長が3[m]とし

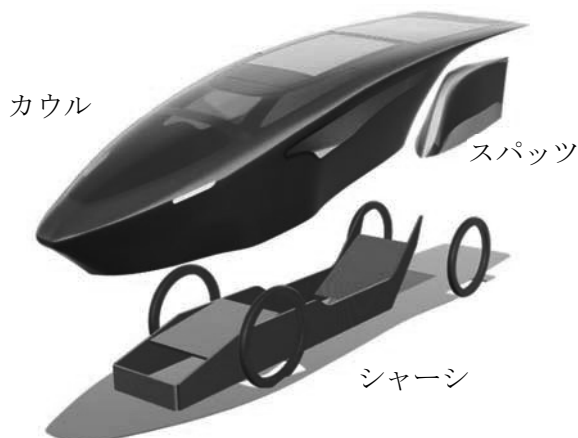


図2 車体の構成

た。試作システムと計測器を搭載し、ドライバー1名が乗車する。

低消費エネルギーで走行するためには軽量で空力特性に優れることが求められる。そこで車体の材料はCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)とノーメックスハニカムを用いた。一般に乗用車はモノコック構造で、車内空間を板材で覆う構造で捻れや撓みに強い。また、車輪を含めたサスペンションをモノコック側面に懸架する構造が一般的である。本プロジェクトでこれまでに製作してきた実験車両のシャーシもCFRPを材料にしたモノコック構造である。従来と同様の構造にするとモノコック部分がホイールベース以上に長い必要がある。人が乗車する4輪の実験車両で全長を3[m]程度にしてカウルで全車輪を覆うようにする場合、カウル後部の形状に制約が生じるため良好な空力特性を得にくい。その制約を避けるために、図2,3に示すように後2輪をモノコックと連続する平板上に独立して懸架することでカウル外に配置できるようにして、カウル形状の自由度を確保した。

外部に配置される後輪にはスパッツを装着し、図3に示すように走行風がカウル側とスパッツ外側を流れる形状にして、後端での乱流の発生を低減した。また、カウルとスパッツの形状や配置は

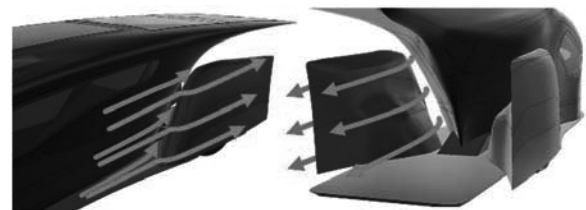


図3 後輪部周辺の空気の流れ

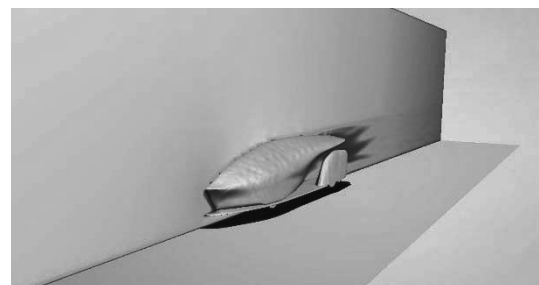


図4 車体周辺に流れる空気による圧力分布

走行時のカウル外部の空気の流れを図4のようにCFD(Computational Fluid Dynamics)でシミュレートし、空気抵抗を低下できるよう最適化した。

3. 車体の製作過程

ここでは車体の製作過程をまとめる。

車体の主要部分はCFRPで製作し、車輪懸架部や操舵機構はA7075で製作した。CFRP製品の製作工程は、その製品と同形状のマスター型を製作し、その反転形状の雌型を製作する。この雌型にCFRPプリプレグを積層して加熱成形し、接着や不要部分の切除をして製品が完成する。

まずカウルのマスター型を製作する。一定間隔で配置された断面形状のテンプレートを発泡材で充填し、テンプレートをガイドにして発泡材を切削あるいは研磨して設計と同形状に成形する(図5(a))。ある程度の形状が得られたら表面をGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)をハンドレイアップで積層して覆う。設計通りの表面形状を得られるまでパテを用いて修正を繰り返す(図5(b))。次に表面にサフェーサを塗布して(図5(c))、平滑に研磨仕上げしてマスター型が完成する(図5(d))。

反転形状の雌型を作製するには、マスター型の表面を離型処理して耐熱性ゲルコート塗布し、さらに雌型の強度を確保するために耐熱性ポリエステル樹脂でGFRPを8mm程度の厚さになるまでハンドレイアップにて積層する。また、加熱時の変形を抑制するために、任意の間隔で断面形状に切断した板を接着する(図5(e))。雌型は加熱成型で硬化した製品を脱型するために抜き勾配を確保する必要がある。本車両のカウルでは形状を3分割して雌型を製作した(図5(f))。

完成した雌型の表面に離型処理を施し、設計した構成に従ってプリプレグやボンドフィルム、ノーメックスハニカムを積層し(図5(g))、大型加熱炉で加熱成形する。カウル全体は3分割したパネルを組み合わせ、接合部の裏面をハンドレイアップで接着し、表面の凹凸部をパテで修正すること



(a) 発泡材切削



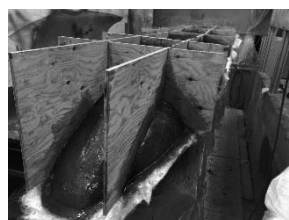
(b) パテ修正



(c) サフェーサ塗布



(d) 表面仕上げ



(e) 雌型積層



(f) 完成した雌型



(g) プリプレグ積層作業



(h) 接着・トリム



(i) モノコック接着



(j) 金属部品接着



(k) 足回り組み立て



(l) 完成した車体

図5 車体製作工程

で組み立てる(図5(h))。

シャーシの製作工程は、まず設計した構成に従ってノーマックスハニカムをCFRPで挟んだサンドイッチ板を作製し、そこからパネルを切り出す。

モノコック部分は、パネル同士の基準点や垂直、平行を出すために治具を製作し、これを用いながら1[mm]以下の精度で位置決めしてパネルを接着する(図5(i))。接着が完了したモノコックに車輪懸架部品や操舵部品を接着し、そこに関連する部品を組み付けてシャーシが完成する(図5(j),(k))。完成した車体全体を図5(l)に示す。

4. CFRP部品の新しい製法の導入

TSCPでは製作に必要な設備や道具を自分たちで構築し、製法も試行錯誤して確立してきた。必要に応じて新しい製作方法を導入することは、製作方法の選択肢を増やすことに加え、製法の調査や試行錯誤する過程で学生の開拓力や技術力などの大きな学びになる。

一般にGFRP製品やCFRP製品の製作作業は手作業によるハンドレイアップ式が多いが、作業者の習熟度による製品完成度の差が大きく、含浸させた樹脂量の過多による質量増大や、樹脂量の不足による強度不足が生じる。TSCPでは以前より図6に示すCFRP繊維にエポキシ樹脂を適量含浸させてあるプリプレグを用いて製品型に積層して真空吸引しながら加熱炉にて加熱成形する方法を採っている。加熱されることでプリプレグに含浸されているエポキシ樹脂が溶解し、真空引きされていることで樹脂が積層部全体に斑なく拡散するとともに成形型に密着することで、精度と強度が高い製品を製作することができる。また、作業性が良いため、作業者の熟練度が低くてもある程度の品質での作成作業ができることが利点に挙げられる。

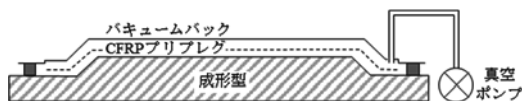


図6 CFRPプリプレグを用いた製法

一般のCFRP産業ではプリプレグを用いた製法は設備や製法の導入が難しく、国内の少量生産の現場ではハンドレイアップ法が継続される中、国外ではインフュージョンによる製法が普及してきた。インフュージョン製法は、図7に示すように製品型にCFRP繊維あるいはGFRP繊維を積層し、真空吸引している状態で外部からエポキシ樹脂を注入する。エポキシ樹脂が全体にまんべんなく浸透するように樹脂の排出部にタンクを設けて余剰分を回収する。全体に浸透できたら注入チューブと排出チューブをクリップで閉塞して製品が硬化するまで真空を保持する。この製法は、強度はプリプレグの加熱成形した製品には劣るが、大規模な設備が不要で導入しやすく、加熱工程がないため製品型の簡素化、加熱時の歪みの発生を防ぐことができるなどの利点がある。

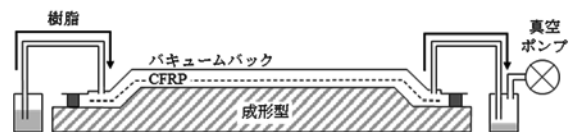
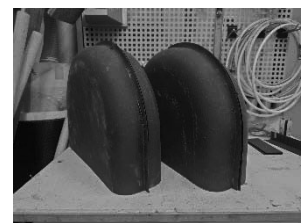


図7 インフュージョン製法

本車両の製作に際し、インフュージョン製法に必要なチャンバータンクを製作し、樹脂の浸透方法の実験や硬化実験を行い、作業工程を最適化した。この製法で本車両のタイヤフェンダーを量産し、プリプレグによる製法に近い精度を得られた。製作作業の様子を図8(a)、完成部品を図8(b)に示す。



(a) インフュージョン作業

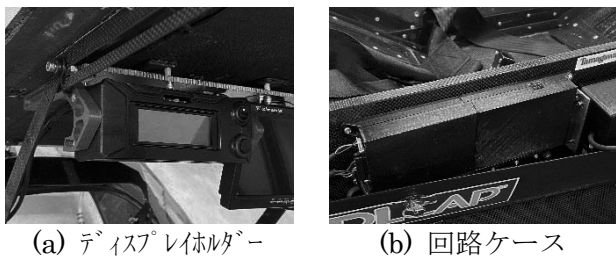


(b) 完成部品

図8 インフュージョン法CFRP部品製作

また、強度を必要としない部品については、学生がデジタルファブリケーションに触れる機会を多く持てるように3Dプリンターやレーザーカット、ワイヤー放電加工などを活用した。一例として、図9(a)に示すようなディスプレイのホルダ

一や図9(b)に示すような電子回路のケース、スイッチの固定部品などを3Dプリンターで出力した。



(a) ディスプレイホルダー (b) 回路ケース
図9 3Dプリンター出力 部品例

5. 電装システム

開発中のメカニカル充電方式マグネシウム空気電池(図10)と太陽電池によるハイブリッドシステムを搭載する。システムは図11に示す構成で、太陽電池とマグネシウム空気電池で発電した電力をシステム電圧にあわせて昇圧してバッテリーを充電しながらモーターで走行する。モーターは左右の後輪を独立で駆動する。2機に分けることで損失の低減を図る。モーターは学生がコイルを巻いて製作し、出力特性を測定して巻き数を調整して本車両に適正化した。車両の主要諸元を表1に示す。

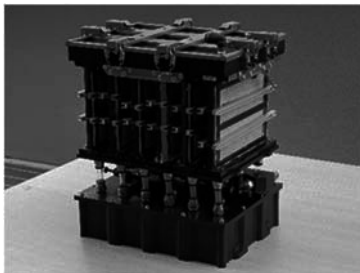


図10 メカニカル充電方式マグネシウム空気電池

計測装置による計測項目を表2に示す。電装の各モジュールは車上に分散して配置するため、各部の電圧・電流はノイズ対策で絶縁アンプを用いて計測する。電流の絶縁計測にはホールセンサーの使用が容易であるが、ヒステリシス特性により電流の積算値に誤差が生じるため、本システムではシャント抵抗での電圧降下を絶縁アンプで増幅して計測する。

計測値はArduinoで収集してドライバーにはLCDディスプレイで情報を表示する。SDカードに

ログデータを保存し、XBeeを用いてテレメータで遠隔監視できるシステムを作製した。

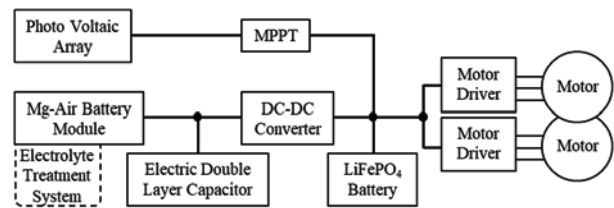


図11 電装システム構成

表1 「S-Mg concept」の主要諸元

車両寸法	3000×690×630[mm]
車両質量	58[kg]
車輪	4輪, 後2輪駆動
太陽電池	シリコン単結晶, 180[W]
MPPT	3ch
Mg空気電池	メカニカル充電方式 11直列
バッテリー	リン酸鉄リチウム(LiFePO ₄) 2直列, 24[V]
モーター	DCブラシレス 150[W] × 2輪

表2 計測項目

マグネシウム空気電池	出力電圧, 出力電流
DC-DCコンバータ	入力電圧, 入力電流, 出力電流
太陽電池	出力電流
LiFePO ₄ バッテリー	出力電圧, 入出力電流
モーター	入力電流, 回転数
操作	スロットル信号, 回生信号
	ブレーキ信号

6. 開発体制

本車両はTSCPに所属するメンバーの3年生を中心にエネルギーキャリアをテーマにしたPBLのとして開発を開始した。当該のメンバーはTSCPに1年次より継続参加しており上級生の手伝い等を通じて製作技術を習得してきた。その技術や経験を他のメンバーに伝承しながら、開発目標や製作方法など技術的な議論を重ねて設計製作を進めた。

設計に使用したCADは、シャーシや金属部品はAutodesk社Inventor、3次元曲面形状のカウルは同社のFusion 360を併用した。Fusion 360の3次元曲

面をモデリングするスカルプト機能を修得するために外部講師によるCAD講習会を実施した。

従来の設計では図面データを各自のローカル端末に保存し、打ち合わせでは担当者が持ち寄って話し合い、必要に応じて複数のデータを手作業でひとつに統合するような手法で設計作業を進めていた。本車両の設計から、データをクラウド上で共有して作業を進める手法を試験導入した。オンライン化することで常に最新のデータを共有できるだけでなく、過去の作業履歴にもアクセスできるため、複数名による設計作業においてデータ管理が容易になった。開発期間中にCovid-19禍の感染予防対策で学生が登校できない期間が生じた。もしローカル端末でのデータ管理のままであった場合は作業の進行が停止したものと推測される。データをオンライン化していたことをきっかけに、設計作業やミーティング、マイコン勉強会などをオンラインで実施することで、スケジュールに遅れが生じたが無理なく開発を継続することができた。製作作業や各種実験などは実物を手にして作業するため対面での実施が必要である。設計段階でも対面による進行が効率的であるが、オンラインでのデータ管理をはじめ、今後も状況に応じたオンラインでの連携手法を構築していく。

7. まとめ

メカニカル充電方式マグネシウム空気電池や電装システムを含め、走行試験を実施して走行の安定性や電装システムの動作を確認できた。各部署で挙げた課題の改良作業や、ドライバーの運転を支援する簡易的なオートクルーズの開発も進めている。マグネシウムを燃料にした運用試験や車両性能の詳細な評価は今後の試験走行で実施していく。また、産学連携先からの依頼を受け、学外でのデモンストレーション走行や公開セミナーでの報告など、研究成果の社会還元も遂行している。

産業や生活の脱炭素化を進める手段として電動化が進む中、エネルギーキャリアの重要性が高まっており、その多様化や再利用が期待される。それらの中の一つの候補として再利用の可能性を持つ資源であるマグネシウムに着目し、研究に連動したPBLのテーマとした。

初期設計から完成までの一連の工程のなかで、メンバーが連携するとともに各自が試行錯誤を積み重ねることで、ものづくりの技術や開拓力、環境やエネルギーへの意識向上などの教育効果が得られているものと考えられる。

参考文献

- 1) 斉藤, 小原: マグネシウム空気電池のみを電源とする電気自動車の開発, 第65回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 2018, p.01-127
- 2) 斉藤, 小原: マグネシウム空気電池を電源とする電気自動車の運用試験, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019, p.01-103
- 3) 斉藤, 小原: マグネシウム空気電池のハイブリッド・ソーラーカーへの応用, 技術史教育学会誌, 第20巻 第2号, 2019, pp.22-28

謝辞

メカニカル充電方式マグネシウム空気電池の電極を藤倉コンポジット株式会社、電気二重層キャパシタを日本ケミコン株式会社にご提供いただきました。Fusion360講習会では株式会社日南の猿渡義市氏にご指導いただきました。深く感謝申し上げます。

2021年12月25日原稿受付, 2021年12月31日採録決定
Received, December 25th, 2021; accepted, December 31st, 2021