

How to build your own solar module

Tomohiro YAMAMOTO^{*1‡}Hideo KIYOTA^{*2}Takashi AKAISHI^{*3}

太陽電池モジュールの自作

山本 智弘^{*1‡}清田 英夫^{*2}赤石 崇^{*3}

Abstract

This report describes the process of building your own solar modules. The fabrication of solar modules requires the use of lamination technology, which is challenging for individuals and students. However, if we can establish the process of building the solar modules ourselves, we can obtain the modules with various specifications based on free ideas. The purpose of this work is to install the modules into the body of a solar car, and the contents of our practice are illustrated as an example. Furthermore, we also demonstrate that high-quality solar modules can be made relatively easily by high school students. Our results are expected to contribute to research and development including product development and related fields.

Keywords : solar module, How to build, do it your self, lamination, solar car

キーワード: 太陽電池モジュール, 作り方, 自作, ラミネート加工, ソーラーカー

1. はじめに

太陽電池を実用的に利用するには、太陽電池セルをモジュール化する必要がある。セルを電氣的に接続したものを、例えば住宅用など耐久性重視で表面層をカバーガラスとしてラミネート加工しアルミ製フレームに納めたものが一般的であるが、ソーラーカーやライトプレーンなどの機体では耐久性よりも軽量化を優先して薄型ラミネート形状となるよう、カバーガラスをフィルム状のものに置き換えることでフレキシブルモジュールとする。目的に応じてモジュールの大きさや形状を決め、さらにはモジュール全体の発電効率を高める目的で、表面層や封止材をより透過率の良いものを選択する。

使用目的に適した構造体で、かつ高効率のモジュール開発を目指すためには、理論値に基づく設計の次段で試

作→量産となるが、これに際してはとくに、ラミネート加工に必要な技術が必要となる。高価な機材の導入とノウハウ、もしくは外部へ加工委託を要することになるが、このうち前者を選択することで「太陽電池モジュールの自作」が可能であれば十分に試作を繰り返すことができ、仕様や形状などで独特なモジュール製品を必要数だけ用意することができる。結果として製品開発や関連分野も含めた各々の研究開発に有効となる。

今回の太陽電池モジュールの自作では、ソーラーカー車体への搭載を目的に実践した内容を例に取り上げて解説を進める。企業レベルの設備を用いることなく、高校生と指導教員の手作りレベルの作業により、比較的容易に、にもかかわらず高いクオリティの太陽電池モジュールが自作できることを紹介する。

*1 Miyazaki Prefectural Sadowara High School, 21567, Shimotajima, Sadowara, Miyazaki, Miyazaki.
880-0211 Japan ‡e-mail: jzf00644@nifty.com

*2 School of Humanities and Science, Tokai University

*3 AKAISHI R&D Co., Ltd.

Received: August 10, 2023, Accepted: September 11, 2023

*1 宮崎県立佐土原高等学校 教諭
(〒880-0211宮崎市佐土原町下田島21567)
‡e-mail: jzf00644@nifty.com

*2 東海大学文理融合学部 教授

*3 アカイシアールディ株式会社 代表取締役

(原稿受付: 2023年8月10日, 受理日: 2023年9月11日)

2. 内容

2.1 モジュールの設計

今回実践例として取り上げる太陽電池モジュールの自作は、ソーラーカーレース鈴鹿2021に出場した「宮工MT-2021」車体への搭載を目的とした。(図1)

競技用ソーラーカーの特質上、太陽電池の搭載は車体形状・寸法内に制限され、搭載蓄電池やモーターなど電力系統の諸条件も考慮しなければならない。車体の走行性能の向上に貢献できるよう、モジュールはより軽量・コンパクトであり、貼り付け面は平面に限らずわずかな曲面となる場合もあるため柔軟性を要する¹⁾。モジュールの発電効率を少しでも上げるため、セルを覆う表面層は透過性の良い素材を用い、できるだけ薄くしたいところだが、例えば走行中の振動や飛石、走行以外の状況下でも何かの接触や応力が加わることも想定内として、ある程度の耐久性を確保しなければならない。搭載する車体に適したモジュールとなるよう、ラミネート構造に必要な表面層フィルム、EVA(エチレン・ビニル・アセテート)封止材等の選定から、モジュールのレイアウト、形状(モジュールごとのセル配列)等々を決定し、材料の入手から作業を進めた。



図1 ソーラーカーに搭載した自作モジュール

2.2 太陽電池セルの選定

太陽電池セルはサンパワー社製(125mm×125mm)を用いた。入手に際しては予算の都合上、安価で購入できる方法を考え、アカイシR&Dを通じてAlibaba.comに出店している業者より、セルコネクタ(バスバー)と合わせて購入した。(図2) セルの最小注文数は150枚で、車体への搭載約200枚に対して300枚の購入とした。

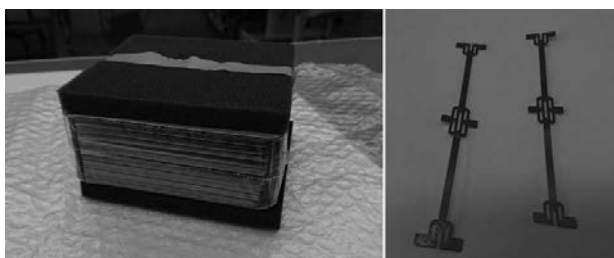


図2 入手したセルとセルコネクタ

「電圧が低い」「傷がある」などの不良品や我々の作業中の失敗により使用できないセルも少なからずあるため、余裕ある数量の入手が適切となる。

商品説明の表記では3.89[W]bin_Me3とあったが、現物はGen3の後期タイプであるも出力[W]は表記ほどの値は得られなかった。この辺りの信頼性は価格相当となるようで、より適切な入手ルートを開拓することが大切である。

2.3 セルのはんだづけ作業

使用するセルはまず簡単なチェックを行う。セル1枚1枚を目視と電圧測定により選別し、不安なものはいったん除外した。電気的なチェックに際しては、学校教室の片隅で眠っていたOHP(教材提示装置)を光源としセル表面に一定光量を当てた状態でチェックを行った(図3)。はんだづけ直前の机上(裏返し状態)においても電圧は現れるが、中には0[V]を示すものもあり、これも除外した。



図3 セルの選別

モジュール製品前の太陽電池セル(いわゆる生セル)を直接手に取る機会は希で、取り扱いに際してはとくに慎重さを要する。セルに擦り傷が付かないよう保護紙を敷き、その上に裏返しで配置し、セル間隔が1mmとなるよう位置決めし、ポリエステル粘着テープ(幅19mm×厚さ0.053mm, 耐熱温度120℃)で固定してから専用のバスバーをはんだ付け接続した。

60[W]のはんだごととφ1mmの電子回路用はんだにてセルに熱を与え続けられないよう一瞬でハンダを溶かす。あらかじめセル「+」「-」端子部を薄くはんだメッキし、その上にバスバーを置き、セルを傷めない程度の重りで押さえながら位置決めし、バスバーの表面にも薄くはんだメッキする。最後にバスバーを竹串や爪楊枝などの先端で抑えながら

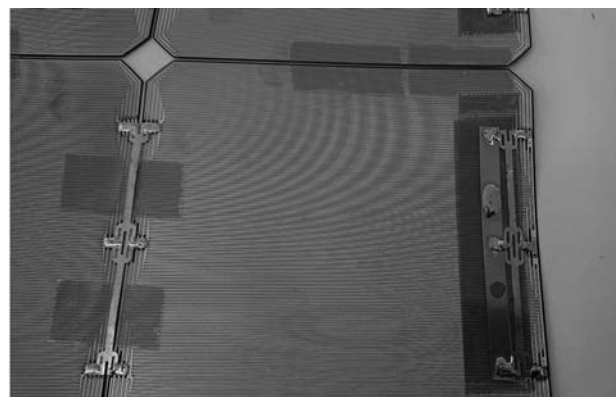


図4 はんだ付け箇所の様子

こて先を当てて、セルとバスバーを密着させる。「こて先を1秒以上当てない」「こて先で圧力を加えない」などを目安にすることでセルへのダメージを極力抑えた。図4にはんだ付け箇所の様子を示す。

今回のソーラーパネルは主に4×3セルを1モジュールとした。(図5) 4直各列の両端は、バスバーがセルの外にはみ出ないように内向きにはんだ付けした。あらかじめ端子の内側部のセル裏面に直接、耐熱および絶縁性の高いポリイミドテープを2枚重ねて貼り付けた。4直列接続したものの3列をギャップ1mmでテープ固定した後、隣列との直列接続およびモジュール全体の電極「+」「-」の取り出し用に、錫メッキを施した銅薄帯をはんだ付けした。このときもセルへの熱に気を使い、薄紙を挟んでのはんだ付け作業を行った。

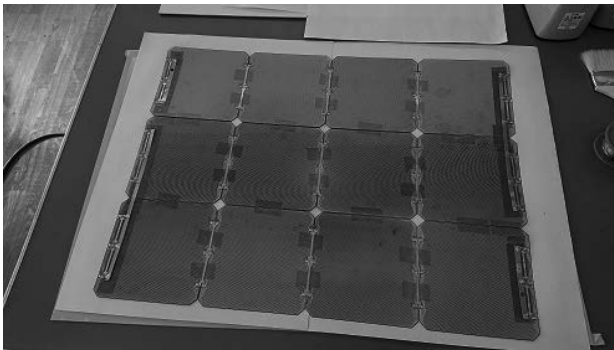


図5 12セルを直列接続した様子

隣列との接続に用いる錫メッキ銅薄帯については、適切なスペック(幅・厚み)の物が入手できない場合は自作も可能である。

材料にはホームセンターで入手した銅薄板C1020(t0.2mm)と鉛フリーハンダ、酸性の液体として洗浄剤「サンボール」を水で5倍希釈した液体を用いた。(図6)



図6 錫メッキ作業の様子

あらかじめカットし中性洗剤でよく洗った薄銅板を「+」、折り曲げて振った鉛フリーハンダを「-」に接続した状態で溶液に浸し、安定化電源で数[V]をかけ、電流が0.3[A]程度になるよう電流調整し、約15分くらいで表面がほどよくメッキされる。念のため薄銅板の向きを裏返して5分ほど継続した。取り出したメッキ板は中性洗剤とスポンジで磨き、さらに

コンパウンドで磨くことでピカピカに仕上がる。必要な幅(今回は7mmと10mm)にカットする際は寸法をノギスで測りながら裁断機(ペーパーカッター)にて行った。(図7)

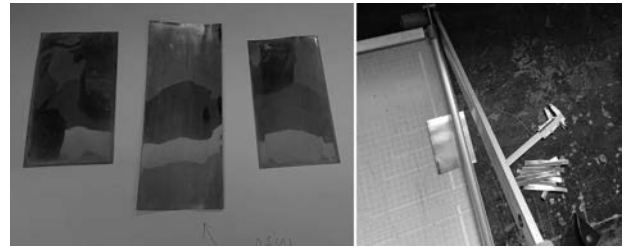


図7 錫メッキを施された薄銅板とカット作業

作業後の廃液はよほど濁らない限り何度でも繰り返して使用できるが、不要になった際は環境破壊とならないようそのまま捨てず、適切な処理が必要である。重曹で中和した後セメントに固めてから産業廃棄物として処分した。

セルを並べるところからハンダ付け作業が完了するまで1時間以上かかり、その間高い集中力を要する。とくにはんだごてによる作業では表面にも保護紙を敷き、完了後もゴミやハンダボール等々がラミネート内に残らないようブラシで優しく掃き取るなど、細心の注意が必要である。

2.4 ラミネート加工

モジュールのラミネート構造については、軽量化と太陽光の透過を最優先とすることを考えたが、モジュールの強度がある程度確保されることを踏まえた結果、表面フィルムとEVA封止材によるサンドイッチ構造とした。(図8)

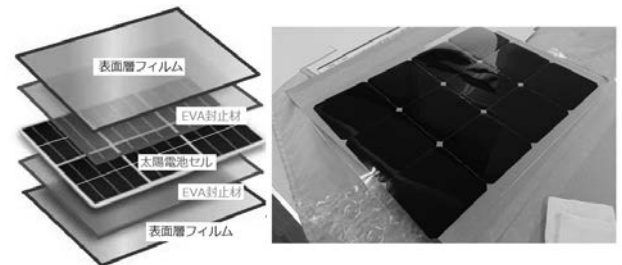


図8 モジュールの構造

表面層のフィルムにはAGC製の高性能フッ素樹脂フィルム「アフレックス」²⁾(厚さ25 μ m両面コロナ処理済)を両面に用いた。バックシートについてはセル裏面がわずかも反射波を受けられるものを検討したが、最終的には表裏両面とも同品を用いた。表裏異なるフィルムによるラミネート品を自作した場合、できあがった製品に反りが生じる心配があった。また、反射波を得る方策としては、モジュール保護や絶縁のためにカーボン車体ボディ表面に白色の光沢フィルム(カッティングシート)を貼り付けるため、これが有効的に機能すると考えた。

セルと表面フィルムとの封止材には、三井化学東セロ製の太陽電池用封止シート³⁾「ソーラーエバ」(厚さ0.3mm)を用いた。アフレックスとソーラーエバについて図9と図10に示す。



図9 アフレックスの切り出し

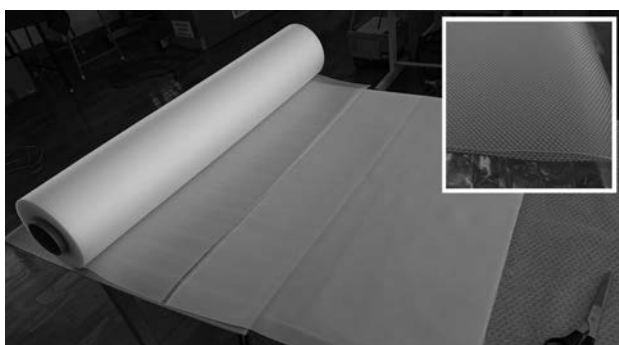


図10 切り出し中のソーラーエバと、エンボス状の表面

ラミネート加工の工法については、最も工夫を要する⁴⁾。事前の検討と実験により、経験ある熱硬化性炭素繊維プリプレグを用いたカーボンコンポジット製品（通称ドライカーボン）の製造工程を応用した。バキュームバッグにて真空状態とした材料を加熱する工法である。

この工法では、熱源ヒーターと真空ポンプの機材に加え、耐熱性のあるバキュームバッグ＋シーリングテープ、ブリーザファブリックなどの副資材を用いる。熱源には調理用1300[W]程度のホットプレート⁵⁾を改造し、熱効率を高めるために合板で自作した木製の窯を用いた。（図11）

ホットプレートは同一製品2台、プレートが取り外し式のアルミダイキャスト製のものとした。2台のプレート上で580mm×640mmの平板が置けるよう縁を削り落とすなどの加工を加えた。

電源はAC100[V]を用いた。バランス良い温度管理のために2台のホットプレートは直列接続としたが、計算上発熱量が不足するため、電圧調整器（スライダック）で130[V]まで昇圧した。これにより125mmセル4×3＝12枚セルのモジュールが最大となるサイズとした。できればもう一回り大きく5×4＝20枚セルのモジュールを作りたいが、このくらいの大きさが自作の設備では適切であると判断した。

温度管理にはオムロン製の温度調節器サーマックシリーズE5CB（SSR駆動用）を用いた。温度調整器本体にSSR（リレー）と、温度センサを組み合わせ、一台のホットプレート内部（ホットプレート付属の温度センサー棒の挿入穴）に埋め込んで制御した。温度管理には別途2台の温度センサを用いて、もう一台のプレート温度の他に、ラミネート加工品の上にも温度センサを置いて本体の温度管理を行った。

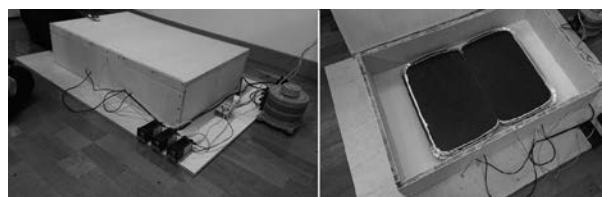


図11 自作窯

温度管理については最も重要で、EVAがしっかり軟化しなければならない。温度が足りないEVAが溶けきれず、温度が高すぎたり加熱時間が長すぎたりすると気泡が発生する。実験の段階で、メーカーのデータシートをもとに、加熱時間と温度の関係をデータ化することでEVAの扱い方をしっかり理解しておいた。

真空引きに際しては強化ガラス上に「フィルム」・「封止材」・「セル（裏返しのまま）」・「封止材」・「フィルム」の順で積層した。（図12）

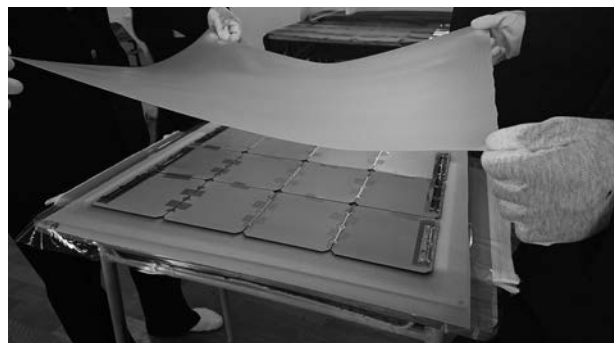


図12 積層作業の様子

ガラス板はガラス専門店にてオーダーメイド入手した。t4 mm 580×460mm全周糸面磨き処理＋4角角落とし加工（1～2mm）と指定した。積層とキュアの作業が時間効率よく同時進行できるよう2枚用意し、これを繰り返し使用した。

ガラス板を用いることで、モジュール表面はガラス板表面同様の平滑な鏡面となるが、その分、微細な埃や繊維屑の混入による痕が目立つため、積層時の作業には埃と、埃を寄せ付ける静電気にも注意しなければならない。

作業場付近はできるだけきれいな環境を保つために、空気清浄機を稼働し、フィルムは都度、ロールから引き出してカットする。フィルムをガラス板上面に直接敷く際には、フィルム表面に送風型静電気除去装置で風を当てながら静電気除去ブラシで埃を除去した。（図13）



図13 左) 空気清浄機と、右) 送風型静電気除去装置

EVAの方は事前にまとめてカットしておくことも可能だが、短期間でもポリ袋に密閉して保管しておく。長期保管ではとくに夏場など高温にならないよう注意が必要となる。「ソーラーエバ」は片面にエンボス加工が施されており、この面がセルに接触する面に配置しなければならないため、向きを間違わないよう注意が必要である。ガラス板+積層物は「バッグフィルム」「ブリーザファブリック」「シーラントテープ」を用いて真空ポンプにて吸引した。(図14)



図14 真空引きの準備の様子

工法はカーボンプリプレグによる成形と同様であるが、単純な方法だとEVAのエンボス面に存在する気体がラミネート内に閉じ込められる。バッグ内の空気の通り道を確認し、真空度を高める目的でブリーザファブリック(ポリエステル製不織布)を挿入するが、上下の表面フィルムが中の積層物すべてを包み込んでしまうと窒息状態となり気泡が残る。これを防ぐために、表面フィルムは必要以上大きすぎないようにカットし、さらにはブリーザファブリックの帯を、セルの外周・上下EVAの間に挟み込んで、フィルム内側から真空ポンプのホース吸引口までの気道を確認することで、上下EVA内の空気がスムーズに抜けるようにした。(図15)

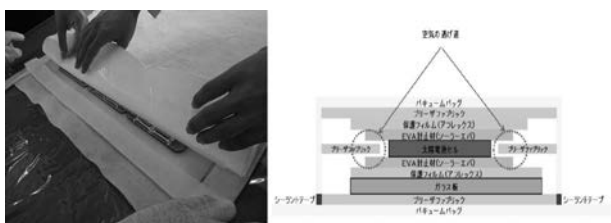


図15 ブリーザファブリックの帯を仕込む様子

卓上にてバッグに挿入し真空引き状態としたものを、あらかじめ加熱しておいた窯内・ホットプレート上に移動する。このとき、プレートに直接触ることで熱によるトラブルとならないよう使い古しのブリーザーファブリックを当て布にして

おくと良い。(図16)



図16 窯内に納めた状態

温度や時間は状況にもよるが試作の結果、基準なるルーティーンを次のように決め、温度など状況を見て時間を調整した。

- ① 加熱開始
投入時→プレート温度設定=160℃
- ② 温度上昇
30~40分後→積層物上の温度=125℃
- ③ 一定温度による加熱
プレート温度設定=130℃ 10分間

加熱が終わり窯から取り出した後、吸引したまま自然冷却し、完全に冷えてから吸引を止め、バッグフィルムを開く。ガラス板にはあらかじめ耐熱液体離型剤「Chemlease_70」にて離型処理を施しておくことで、密着したソーラーパネルは割とスムーズに引き剥がすことができるが、モジュールが折れ曲がらないよう隙間に薄紙を差し込みながら慎重に剥がした。余白部分はハサミで大まかに切り捨て、後の段階で余白5mmとなるようカッターナイフでトリミングした。(図17)



図17 焼き上がった後の処理作業



図18 完成したモジュール

完成したモジュールは極薄フィルムとEVAの構成により軽量で柔軟なパネルに仕上がった。(図18) 4×3=12セルのモジュールで250[g]程度、1.26[kg/m²]となった。柔軟性があり、持ち運びの際には重力で折れ曲がらないよう注意が必要となる。搭載する車体表面がt12[mm]のカーボンサンドイッチパネルであるため、ボディ貼り付け後は何ら問題はないが、貼り付けまでの取り扱いには十分に注意が必要となった。

ラミネート加工後のモジュールは、電極となる箇所=あらかじめはんだメッキしておいた端子部分のラミネートを小さくカッターで剥がして、はんだ付けによる配線ができるよう施す。設置前に計器を接続し、開放電圧と短絡電流を測定することで基本的な動作確認が取れる。

独自のラミネート加工法により市販品と遜色ないソーラーパネルを量産することができた。ただ一点この工法により多量の副資材を用いたことで少なからず廃棄物を出してしまうこととなる。必要以上に廃棄物を出さないことがこの工法の課題であると考えられる。

2.5 車体への搭載

太陽電池モジュールの車体搭載⁵⁾については、競技車両規則の上限6㎡は考えず、「車体にどれだけ搭載できるか」を検討し、125mmセルが無駄なく貼れるよう車体寸法の修正を部分的に行った。(図19)

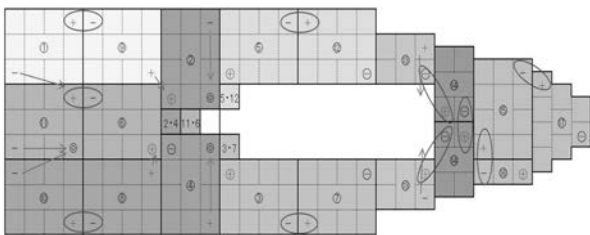


図19 ソーラーパネルの配置図

基準は4×3=12セルモジュールとし、それが入りきらないエリアには2×3=6セルモジュールを、さらに車体前方には変則的な形状のモジュールを用意した。(図20) 「1×3」「1×1」なども用意し可能な限り貼り付けた。自作による自由度を生かし、結果的に196セル=約3㎡の搭載となった。



図20 車体前部、変則的な形状のモジュール

ソーラーカー車体へのモジュール貼り付けと配線は独特

な方法となる。ボディ全面に白色フィルムを貼り、配線の穴開け後に両面テープで貼り付けた。テープには厚さ0.2mm×幅19mm、ポリエステルフィルム基材・アクリル系粘着剤・耐熱性、耐候性のものを用いた。(図21)



図21 車体への貼り付け作業

配線は基本、ボディ裏側で行う。モジュール電極に平タブ線(t0.2mm×幅6mm)をはんだ付けし、ボディ裏へ貫通させ、そこから先は絶縁電線を用いて、モジュール同士の直列接続やアッパーボディ内側に設置したMPPT(最大電力点追従制御装置)へ接続した。一部、パネル板面の裏側がむき出しの単板部分については貫通穴を設けず、ポリイミドテープで絶縁した平タブ線をあらかじめモジュール裏面に貼り付けることで、それを導線とした。

自作モジュールの負荷は、ソーラーカーの動力となるモーター蓄電池となる。MITSUBA製ダイレクトドライブモーター(定格72V・1500W)+18650リチウムイオン電池セル460本=23並列×20直列とし、MPPTを介してこれに接続した。MPPTには分散型・昇圧タイプのKW-MPPT(柏会製)⁶⁾を8個用いた。(図22)



図22 自作モジュールの負荷となる電力系統

基本的に12セル1モジュール×2直列接続に対し1個のMPPTとし、これを2並列×4直列とした。(図23)

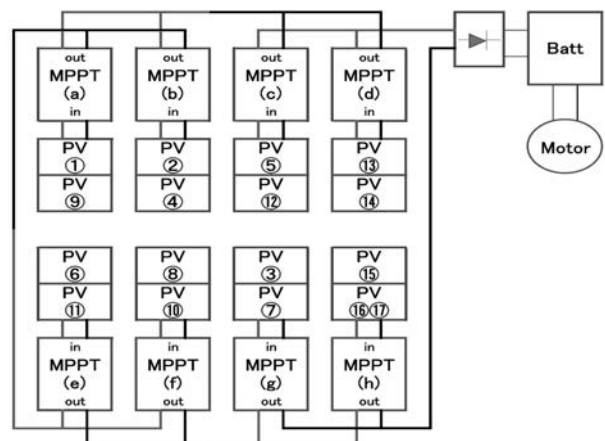


図23 ソーラーパネルの配線系統図

24セルの $V_{pm} = 12.8[V]$ に対してバッテリーの定格電圧72[V]で動作するとMPPT1個あたり18.0[V] 昇圧比=1.41となることを設計段階で算出した。約 $3m^2 \cdot 196$ セルとシステム電圧72[V]の組み合わせにはこれが適していると判断した。

2.6 自作モジュールの評価

太陽電池モジュールの評価試験に際しては試験環境の構築が必要である。ソーラーシミュレータなど安定した光源の下で、温度管理も行いながら発電の測定を行うが、特別な装置が無い場合は、同一条件下における相対的な評価とすることも考えられる。

今回の自作ソーラーパネルについては、4×3モジュールに対して静的試験を行ってみた。屋外での直射日光に対して十分な照射が得られるよう角度を固定し、その際の開放電圧や短絡電流、可変抵抗器を負荷として接続し変化させることで、簡易的なI-V特性試験とした。(図24左)

動的試験は実践の場となった。ソーラーカーレース鈴鹿2021の5時間耐久レース出場車両に搭載し、車体に搭載した電圧・電流・積算計やロガーにより発電の測定を行った。(図24右) これについて同じ5時間耐久レースを走行した他車の発電量と比較とした。Gochermann Solar Technologyが2012年に製造した太陽電池モジュール(サンパワー社製セル C60K)を搭載したFALCON(静岡ソーラーカークラブ)に対し、5時間走行における総出力を比較したところ、面積あたりの発電量は同等な値であることを確認した。ボディ形状など条件は多少異なるものの、自作ソーラーパネルは他車と遜色なく、十分機能していることを確認できた。心配される走行中の振動や路面からの飛散物に対してもダメージを受けることなく、少なくとも通常走行時における耐久性を証明することができた。

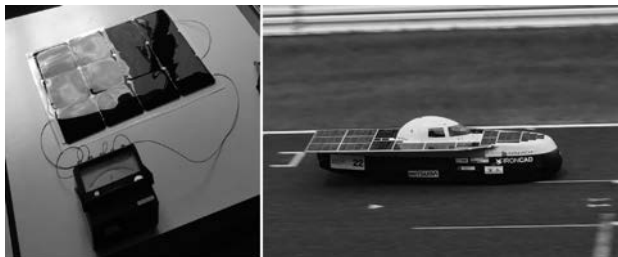


図24 「静的試験・短絡電流の測定」(左)および
「動的試験・宮工MT-2021の走行」(右)

今回のようにソーラーカーへの搭載となると、太陽電池貼り付け面の車体形状や走行時の進行方向等々により得られる日射量は安定しないし、走行時の負荷も常に変動する。もそもそも日照条件や気温などの自然環境も時間経過と共に変化する。測定条件がリアルタイムに変化するため、モジュールの評価は難しいものとなるが、研究材料としては大変興味深い取り組みになることが考えられる。今回のように太陽電池モジュールの自作が様々な研究で用いられることを期待したい。

3. おわりに

太陽電池モジュールに関連する研究などの取り組みは様々で、その中で太陽電池モジュールを自作できることは有効的である。モジュールの高効率化を目指す製品開発から、用途に応じたモジュールの開発まで、研究者による試作はもちろん製品として用いることもできる。

実際に、2021年のTeam宮工(宮崎工業高校ソーラーカープロジェクトチーム)が教員と高校生主体で成功を納め、さらには東海大学九州キャンパスでは学生や一般向けに製作講習会を開催するなど、太陽電池モジュールの自作は現実的なレベルとなっている。製作講習会はワークショップ形式で、今後も要望に応じて開催していく方向にある。

本稿で紹介した内容が、学生など若い方々の基礎研究、製品開発、関連分野の研究に役立、また、中・高生など将来の技術者となるさらに若い方々のものづくり学習に役立つための一助となれば幸いである。

謝辞

本稿で紹介したプロジェクトの中で「ソーラーパネルの自作」にご協力いただきました方々、三井化学東セロ株式会社、AGC株式会社化学品カンパニー、野村商会、国際NGOソーラーネット、ZDPSHOP、アデレードソーラーカー研究所をはじめとする諸関係者の方々に、この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本太陽エネルギー学会, エコ電気自動車のしくみと製作, 158-159 (2006), オーム社, 東京.
- 2) 株式会社AGC化学品カンパニー, アフレックス (accessed Sep.1 2023), <https://www.agc-chemicals.com/jp/ja/fluorine/index.html>
- 3) 三井化学東セロ株式会社, 太陽電池用封止シート (accessed Sep.1 2023), <https://www.mc-tohcello.co.jp/product/solar/solar.html>
- 4) ソーラーネット(NGO), 手づくり太陽電池, 9-18 (2002), ソーラーネット, 埼玉.
- 5) 2011型ソーラーカー”Tokai Challenger”の開発(電気編), 電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会資料, 79-82 (2012), 日本太陽エネルギー学会, 東京.
- 6) 柏会における車両性能向上の取り組みと分散型MPPTの開発, 電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会資料 36-44(2015), 日本太陽エネルギー学会, 東京.