

2023年BWSC のソーラーカー最新動向

Latest Trends of Solar Cars in BWSC 2023

木村英樹*, 福田紘大*, 佐川耕平**

1. はじめに

オーストラリア大陸 3,000km を縦断するソーラーカーの国際大会, Bridgestone World Solar Challenge 2023¹⁾ が 10 月に開催された。2021 年大会は, COVID-19 の影響でキャンセルとなったため, 4 年ぶりの開催となる。1987 年の第 1 回大会から数えると, 実に 36 年目 & 17 回目を迎えたことになる。2023 年大会は 23 か国から 41 チーム (内訳: チャレンジャークラス 31 チーム, クルーザークラス 10 チーム) がエントリーした。メインクラスとなるチャレンジャークラスは, 1 人乗りの競技用ソーラーカーで, 走行開始後は太陽エネルギーのみで走行する。ダーウィンをスタートし, アデレードに最も早く到着したチームが勝者となる。一方, クルーザークラスは, 2 人以上が乗車するなど実用性を重視した太陽光発電システム搭載電気自動車で, 定められたペースで走行する。その際の充電量などをもとにスコアが計算される採点競技となる。

筆者らが所属する東海大学ソーラーカーチームは, 2019 年に引き続き 2023 年もチャレンジャークラスに出場した。ここでは, 最新のレギュレーションに合わせて開発されたソーラーカーおよびその主要デバイスの動向について紹介する。

2. 2023 年大会の特徴

大会のレギュレーションは, ソーラーカーの形状を大きく決定する。2023 年大会レギュレーションのうち, 2019 年大会からの大きな変更点として, 以下が挙げられる。

- 1) 化合物太陽電池の禁止 → シリコン太陽電池のみ
- 2) リン酸鉄リチウムイオン電池 36kg の重量制限明示 (2021 年レギュレーションでは, 40kg)
- 3) 4 輪必須であったタイヤホイールが 3 輪も選択

可能に

- 4) コックピットの大型化 (PVC PAT 人形)
- 5) アプローチアングル, デパーチャーアングルを 10° 確保
- 6) 最低地上高が 100mm に増加
- 7) ナンバープレートをボディ最後端に垂直設置

これらの変更点については, 後述することにする。今大会の特徴としては, ブッシュファイヤー (野火) による煙で, 太陽電池の発電量が前半に大きく減少したことである。この影響で多くのチームで, 前回 2019 年大会よりも平均速度が低下した。このような条件下で, Fig. 1 に示したベルギーのルーベン大学を主体とする Innoptus Solar Team (名称変更の歴史 Umicore 社 → Punch Powertrain 社 → Agolia 社 → Innoptus 社) の Infinite が 2 連覇を成し遂げた。Fig. 1 を見ると, 車体下部の前後が従来のソーラーカーよりも持ち上がったデザインとなっているのが分かる。



Fig. 1 Infinite of Innoptus Solar Team.²⁾
 図 1 Innoptus Solar Team の Infinite.²⁾

* 東海大学工学部 教授

** 東海大学工学部 講師

3. 太陽電池の動向

太陽電池については、2019年大会当時はシリコン太陽電池の場合にはセル面積の合計で 4m^2 以下、単接合薄膜太陽電池 3.56m^2 以下、多接合薄膜太陽電池 3.24m^2 以下、多接合化合物太陽電池 2.64m^2 以下となっていた。これが、21年のレギュレーション変更では、原則的にシリコン太陽電池のみとなり、有毒な元素を含むGa As, Cd Te, Cu In Ga Seといった太陽電池は禁止。毒性が低いと期待されるペロブスカイト、有機系については個別に審査するとされ、23年大会も継続された。そのため、ほとんどのチームがシリコン太陽電池を選択した。

2020年8月、裏面電極型シリコン太陽電池で有名なSunPower社からMaxeon Solar Technologies（以下、Maxeonと表記）社が分離して誕生した³⁾。ほとんどのチームは、このMaxeon社のIBC（Interdigitated Back Contact）セルであるMaxeon Gen. IIIを使用した。データシート上は、Ultra High Performance仕様Ke1で23.1%、Ultra Premium Performance仕様Le1で23.7%、Ultra Peak Performance仕様Me1で24.3%と表記されていた。東海大学チームはMe1を入手したが、24%台のセルはごく一部で、23%台のセルがほとんどであった。とくに高い変換効率のセルは、一般の流通ルートでは入手が困難であるように見受けられ、メーカーに直接コンタクトするか、特別なルートを確保したチームのみが得られているようであった。東海大学ソーラーカーTokai Challengerでは、ドイツのGochermann Solar Technology社でモジュール化したものを搭載し、総合5位となった。

最先端の太陽電池として、Maxeonの開発段階品を採用したチームもあった。開発中のMaxeon 7パ

ネルは、NERLの測定でモジュール効率24.7%を達成した。この結果から、セル効率は25%を越えたと思われる。執筆時点での世界最高記録は、LONGi社シリコン系ヘテロジャンクションの26.81%であり、量産に近いレベルで25%のセル変換効率を越える時代を迎えつつあることに驚きを隠せない。公表値の上では変換効率25%以上のセルを使用したチームも存在し、 4m^2 の太陽電池総出力が1000Wという表記のソーラーカーがあった。

さらに、オランダのTop Dutch Solar Racing（フローニンゲン大学主体）のソーラーカーGreen Thunderは、オクスフォード大学からスピンアウトしたOxford PV社の技術を用いて、太陽電池の表面にペロブスカイト型太陽電池を積層したタンデム型としたものを搭載した。30%の出力増加が見込まれるとされ、セル変換効率も30%に達していたと見られる。

今回優勝したベルギーのInnoptus Solar TeamのソーラーカーInfiniteは、 4m^2 で1250Wの太陽電池パネル出力と表記されていたので、31.25%の変



Fig. 3 Tokai Challenger of Tokai Solar Team.
図3 東海大学ソーラーチームのTokai Challenger.

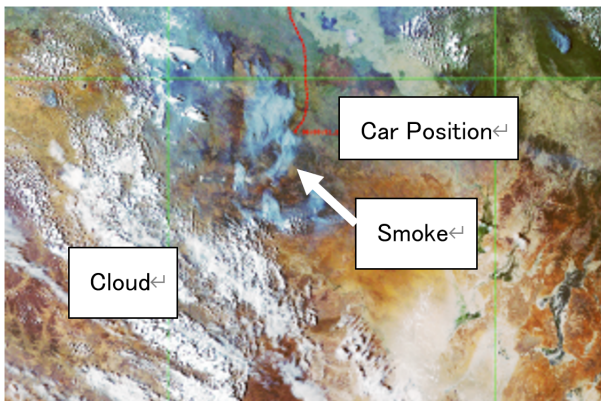


Fig. 2 Satellite Image of Bush Fire.
図2 ブッシュファイヤーの衛星画像.

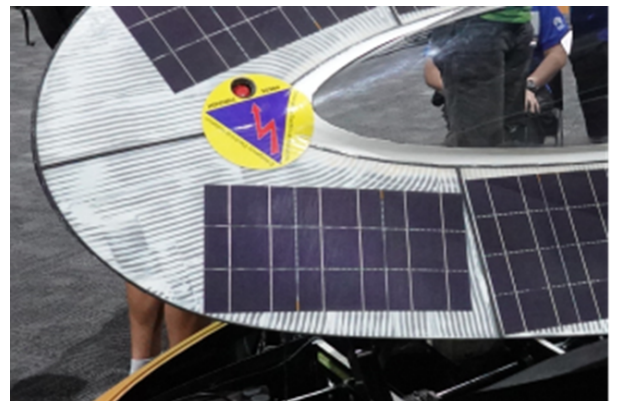


Fig. 4 Solar Module of Top Dutch.
図4 Top Dutchの太陽電池モジュール.

換効率となる。ベルギーの研究機関 IMEC の支援を受けたとされ、やはり Top Dutch と同様にペロブスカイトタンデム型太陽電池モジュールを搭載していたと見られる。しかしながら、外観は、ベースとなった Maxeon IBC セルの外観と見分けがつかないほどであり、識別することが難しいといった課題があるように思えた。最近の BWSC では、開発段階品の製品が持ち込まれることが多く、まさに技術のショーケースとして大会は機能していることが分かる。

オランダの強豪 Brunel Solar Team (Nuon 社 → Vattenfall 社 → Brunel 社) は、メインスポンサーを変えながら今日に至るデルフト工科大学主体のチームである。チームメンバーによれば、スイスから来たフレキシブルモジュールで、シリコン系薄膜と化合物のタンデム太陽電池を使用しているという説明であった。レギュレーションの趣旨からは、ペロブスカイト型太陽電池ではないかと考えられ、LONGi 社のモジュールではないかと見ているが定かではない。本誌の読者の中で心当たりがある方が

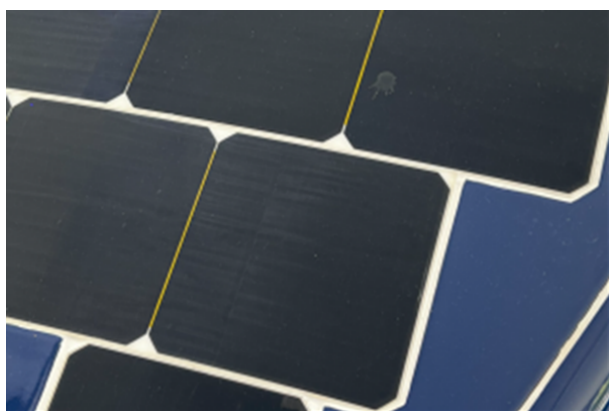


Fig. 5 Solar Module of Innoptus Solar Team.
図 5 Innoptus Solar Team の太陽電池モジュール。



Fig. 6 Solar Module of Brunel Solar Team.
図 6 Brunel Solar Team の太陽電池モジュール。

居られたら、ぜひお知らせいただきたい。

アメリカの古参ミシガン大学は、First Solar 社の支援を受けていた。First Solar 社は、SunPower 社のシリコンセルの上に Cd Te 太陽電池をタンデム化する技術を有しており、もしかするとそちらが使用された可能性はあるかもしれない。しかしながら、Cd Te 太陽電池と見なされるか Si 太陽電池かで、大会側の適否の判断が分かれる。また、First Solar 社は、2023 年 5 月にスウェーデンのペロブスカイトベンチャーの Evolar 社を買収しており、ペロブスカイト型である可能性も十分にある。単に、開発段階の Maxeon セルを使用しているに過ぎない可能性もあり、詳細は不明である。

化合物太陽電池については、禁止と解禁を繰り返した歴史があり、1990 年に禁止、1999 年に解禁となり、2011 年に事実上の禁止となった。これが 2017 年に解禁され、2021 年に再び禁止となったため、今後の動静については予測が難しい。たとえば 2017 年は、薄膜層に含まれる元素であれば使用量が微量であり、環境影響が低いとして再解禁となった。ところが、ペロブスカイト型太陽電池の材料にも RoHS 指令の対象となる有毒な鉛が使用されるため、薄膜の Ga As 系や CIGS 系が認められない規制と整合性がとれていない。タンデム型のようにボトムセルとトップセルの種類を組み合わせることで、多種多様な太陽電池が登場した結果、レギュレーション上の線引きは明確に切り分けることが難しい状況に陥っているといえる。

同様な変更として、ホイールレイアウトについては、車体の安定性を確保するために 2013 年以降は 4 輪が義務付けられた。これが、21 年以降から安定性では不利となる 3 輪が認められるレギュレーションに戻された。この理由として大会側は、車体形状



Fig. 7 Solar Module of Michigan Solar Team.
図 7 Michigan Solar Team の太陽電池モジュール。

のマンネリ化を防ぐために、4年に一度のタイミングでレギュレーションの大きな変更を行ってきたことが挙げられる。つまり、車体の外観形状を変えざるを得ない状況を作ることが重視されているようにも見受けられる。

なお、ペロブスカイトとシリコンのタンデム太陽電池については、大会側で個別審査されて使用が認められることはあっても、実力に応じた面積で本来は規定されるべきであった。具体的には、出力が3割増しのタンデム電池に対して、通常のシリコン太陽電池と同等な 4m^2 を与えることは、明らかな過剰設定であった。レギュレーションの趣旨に則り公平性を保つ上では、実際的には 3m^2 程度以下とすべきであったと考える。

4. バッテリーの動向

バッテリーは、相変わらずリチウムイオン系が主流となっていた。その中でも、新しいレギュレーションとしては、リン酸鉄リチウムイオン電池とリチウム硫黄電池の搭載重量が規定されたことは特筆に値する。リチウムイオンおよびリチウムイオンポリマー電池が 20kg の上限であるのに対し、安全性が高いとされるリン酸鉄リチウムイオン電池は、 36kg とされた。なお、徐々に製品化が進行しているリチウム硫黄電池は 15kg と規定された。いずれも、 5kWh の容量になるよう考えられた数値であるが、それぞれのタイプの開発状況によって有利不利が発生する状況が生じることになる。

本学チームは3輪化した場合であっても、車両を横方向に 45° 傾けた際に転倒しないよう、低重心化が必要であると考えた。そこで、今回は若干ではあるが蓄電エネルギー総量でも有利になるリン酸鉄リチウムイオン電池を選択した。中国EVE Energy



Fig. 8 Li Fe P O₄ Cells.
図8 リン酸鉄リチウムイオン電池。

社のLi Fe P O₄セル IFR33140（定格 3.2V - 15Ah ）を4並列32直列とした 6.1kWh の組電池を製作した。なお、外装の電極はアルミ製であり、セル間に同じ素材であるアルミプレートを置き、セルの電極とアルミプレートの間をレーザーで溶接することで組電池とした。

リン酸鉄リチウムイオン電池の放電カーブから、電池残量（SOC）を推測することは、電圧変化が小さいことから難易度は高い。

一方、1～4位のチームは従来に比べ1.5倍のエネルギー重量密度を誇る、Amprius社の次世代型リチウムイオン電池を搭載していた。軍用としても利用されるこのリチウムイオン電池の特徴は、通常、電池の正極にグラファイトが用いられるところを、シリコンに置き換えたことである。従来から、シリコンを正極に添加することで、容量が増加することは知られていたが、Liイオンを取り込むことで電極体積が膨張し、クラックが入るなどで充放電サイクル寿命とトレードオフ関係になるとされてきた。これをAmprius社では、100%シリコンの正極とすることで、一気に容量を増やすことに成功したようである。

基準となるリチウムイオン系電池の容量にもよるため、1.3倍という話もある一方で、 450Wh/kg のエネルギー重量密度を持っているという情報もあった。（ただし、この場合は充放電サイクル寿命が200回程度と少なくなると推測される。）詳細は明らかではないが、筆者らは 20kg のセル合計重量で 9kWh 程度の電気エネルギーを蓄えることができていたと考えている。

太陽電池とバッテリーについて、今回のBWSCでは欧米勢の有力チームは、開発段階にある格段に

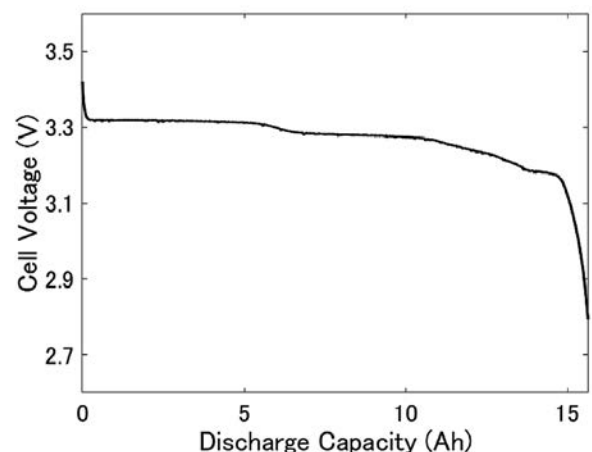


Fig. 9 Discharge profile of Li Fe P O₄ Cells.
図9 リン酸鉄リチウムイオン電池の放電特性。

高性能化された製品を搭載することに成功したため、上位を独占することになったと分析している。

5. 空力デバイスの動向

BWSC 2023 における空力デバイスで最大の話題となったのは、Fig. 1 に示した Innoptus Solar Team の垂直翼である。この新しい技術をアピールすることによって CSIRO（オーストラリア連邦科学産業研究機構）より、Innovation Award が授与された。この垂直翼によって、横風が吹いた際に推進力が得られるとの説明であった。車体の静止時に横風が吹けば推進力は得られないことはないが、翼面積も小さく、走行時には、相対的な流入風の角度（偏揺角）も小さくなるため、筆者らは実際の走行時には大きな効果は得られなかったと考えている。横風が吹いた際には空力的な安定効果を生み出す翼として機能したといった表現もあったが、この効果もよくわからないというのが率直な感想である。チーム上層部に独自に確認したところ、推進力は期待していたほど出ていなかったという証言もあった。確立された技術になるには、まだまだ開発期間と検証時間が必要であると思われる。

本学チームは、「車両後端にナンバープレートを垂直にしなくてはならない」というレギュレーションに対応するために、下図に示した空力プレートを開発した。ボディ側面および下側から流れてきた風をプレートとボディ表面との隙間部に導くことでナンバープレート部では離れを抑制する形状となっている。さらに、プレートの後端は波状となっており、縦渦を発生させることでプレートの後方に現れる強い速度せん断層と乱流渦を早く減衰させ、抗力を低減することを狙ったデバイスとなっている。この効果については、CFD 上で効果を確認できた。



Fig. 10 Developed Aerodynamic Device.
図 10 開発された空力デバイス。

車体全体ではわずかに走行消費電力が減少したようにも感じたが、横風などの外乱成分が多かったため、今後は、詳細な検討とさらなる改良を行う予定である。

6. レギュレーションに対応する車体形状の苦悩

前述したとおり、今大会では 2019 年大会から大きくレギュレーションが変更となり、車体設計に影響をおよぼした。一つ目は、体格の大きな人物も搭乗できるコクピットを設けなければならないことである。具体的には、Fig. 11 に示す身長 190cm を超え、肩幅の広い塩ビ製のパイプ人形をコクピットに乗車させなければならない。グローバルな大会ゆえに考慮されたレギュレーションにも思えるが、車体全幅をコンパクトに抑えるのが困難な制約の一つとなった。

2つ目は、アプローチおよびデパーチャーアングルを 10° 設けなければならない事である。これらについては、未舗装路や段差のある路肩、車速規制用のバンプなどを超えるシチュエーションが多い大会であり、車両にダメージを負わせないためにも有効なレギュレーションといえる。一方で、 10° の角度を確保するためには、車両前後の底部を絞る必要があり、車内の空間が狭くなり結果的に搭載物やコクピット空間の設計に影響が出る。

これらのレギュレーション変更により、フロント

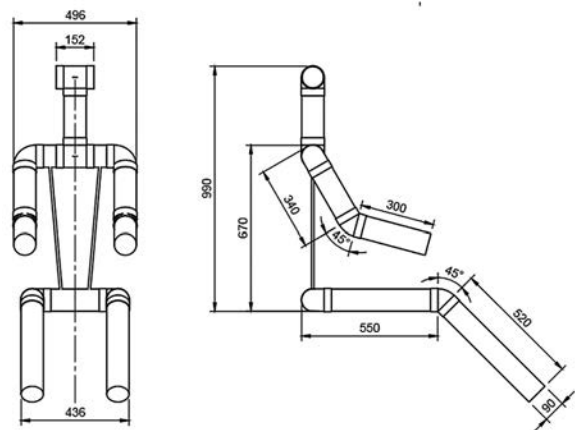


Fig. 11 Dimension of Mr. PVC-Pat.
図 11 PVC バット人形の寸法。



Fig. 12 Approach and departure angles.
図 12 アプローチアングルとデパーチャーアングル。

タイヤ周辺の空間を確保することが困難となる。東海大学は、フロントタイヤ周辺の空間を確保するために、ステアリングを切った際のタイヤ可動域に干渉しない範囲まで車体の全幅を広めるシンプルな構造を採用したが結果的に、空気抵抗を高めることになったと考えている。

一方、トップ勢については、全幅が広がることによる空力性能の悪化を嫌い、直進走行時に合わせタイヤハウスの空間を設計し、ステアリングを切った際にタイヤが車体から飛び出す複雑なシャッター機構を採用していた (Fig. 13)。

直進路が支配的なBWSCにおいては、シャッター機構が動作するシーンは少なく、全幅が抑えられることによる空気抵抗の低減効果が大きかったと考えられる。

7. 再生材の活用

BWSC 2023の中で新しいトレンドとなったのは、材料のリサイクルである。ブリヂストンは、今回の大会のために、従来の低転がり抵抗性能と耐久性を



Fig. 13 Shatter mechanism of front wheelhouse.²⁾
図13 フロントタイヤハウスのシャッター機構。²⁾



Fig. 14 New tire using ENLITEN technology.
図14 エンライトン技術を使用した新型タイヤ。

維持しながら、再生材料をできるだけ多く使用するという新たな技術課題を設定して、ソーラーカー用ラジアルタイヤを開発した。

再生資源・再生可能資源比率63%のENLITEN技術は、ブリヂストンとしてモータースポーツ界に初めて投入することになった。タイヤサイズは95/80R16で、ラジアル構造を採用している。栃木県のブリヂストン・ブルーピング・グラウンドと、秋田県の大潟村ソーラースポーツラインで走行テストを繰り返し、その転がり性能と耐久性が確認された。実際にダーウィン～アデレード間を走り切る耐久性はあったが、当チームでは未舗装路走行時に受けたダメージの影響を懸念して、念のため大会期間中に1度だけ交換を行ったが、3,000kmを走破できる耐久性があったと評価している。

さらに当チームでは、東レが開発したリサイクル・カーボン・ペーパーを、インナー・タイヤカバーやコックピット・フロア面に採用した。このカーボン・ペーパーは、カーボン・プリプレグ材をトリミングした際に発生する炭素繊維片を集めて、紙のような繊維構造としたものである。

8. 軽量化への挑戦

物体が地上を動く以上、重量が軽いに越したことはない。最大でも950Wに満たない太陽電池からの電力で、時速90kmの巡航を実現させるソーラーカーを目指すには、文字通り1gでも多く重量を削る挑戦が重要である。軽量化のために炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を用いることは、レース業界のみならずスポーツや、一般の乗用車にも活用されるケースが増えてきている。BWSCに参戦するソーラーカーにおいてもほとんどのチームが車体の主材

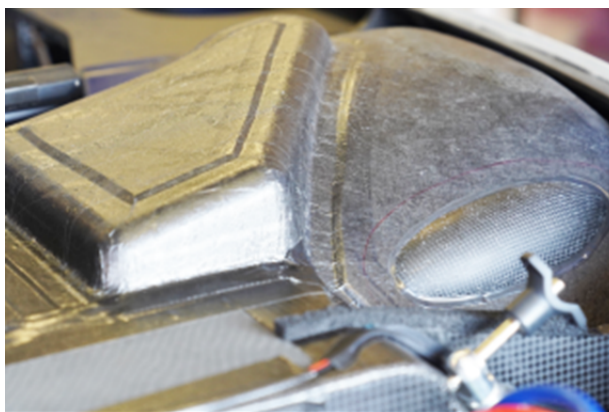


Fig. 15 Inner cover using recycled carbon paper.
図15 リサイクル・カーボン・ペーパーを使用した内部タイヤカバー。

料にCFRPを採用している。

東海大学も東レ・カーボンマジックと協力し、最先端の炭素繊維材料を用いた最軽量のCFRP製車体の開発を目指した⁵⁾。高い剛性が求められるアッパーの外皮部分には、宇宙用途の高弾性・高強度炭素繊維である東レ製M55を用いた。こちらは、1プライ構成(約0.08mm)で積層されているが、薄いながらも十分な強度を実現した。また、コア材料には、低密度で軽量化が可能なポリメタクリルイミド硬質発泡体であるROHACELLを用いた。複雑な曲面を有する車体であるため、形状に合わせコア材には、細かい厚みのコントロールが求められたため、複数の厚みにROHACELLを加工した。また、車体側面などの曲率が高い部分のコア材については、通常の板形状のROHACELLでは加工が困難であることから、六角形状にカットしたROHACELLシートであるコアフレック転写シート(Fig. 16)を用い成形するミルフィーユコンポジット製法にて成型した。これらROHACELLの加工には、発泡体の薄加工が可能である米島フェルトが



Fig. 16 Core flake transfer sheet.
図16 コアフレック転写シート。



Fig. 17 Completed ultra-lightweight body.
図17 完成した超軽量車体。

担当した。

これらの徹底した最適化により、東海大学の2023年型の車体重量は、24.6kgであり、2019年型と比較し、50%もの軽量化を実現した(Fig. 17)。

また、車体と同様にカーボン製ホイールについても材料の見直しと積層構成の最適化を進めた。ホイールは走行中の車両の荷重や路面からの衝撃に耐える必要がある。このため、炭素繊維には、T800と前述したM55をミックスした構成とし、コア材をノーメックスハニカムコアからROHACELLに置き換え、従来の1650gから1350gへと約20%の軽量化を達成した。

これらの徹底した軽量化を図ることにより、完成したソーラーカーの重量は、101kg(バッテリー含まず)となり、出場チーム中最軽量な車体を実現した。

9. まとめ

COVID-19の影響から2021年大会が中止となり、日本勢にとっては、実に4年ぶりの海外大会となっ

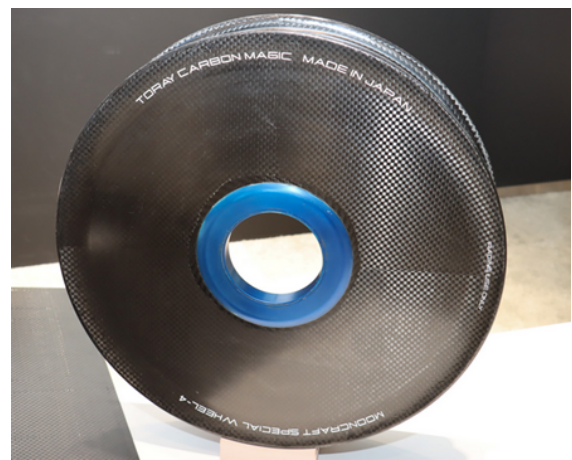


Fig. 18 Newly developed ultra-lightweight carbon wheel.
図18 新たに開発した超軽量カーボンホイール。



Fig. 19 Goal seen of Tokai Solar Team.
図19 東海大ソーラーカーチームのゴールシーン。

た。技術的には、シリコン系太陽電池にペロブスカイト型太陽電池をタンデム搭載したモジュールの投入や、従来型より飛躍的に容量が向上した新型リチウムイオン電池の登場などにより、悪天候やブッシュファイヤーの影響を受けつつも、大会主催者の予想を超えたペースでのレース展開となった。上位を占めた欧米勢は、COVID-19の混乱から、いち早く活動が再開となり、2021年レギュレーションに準拠した車両を開発し、世界大会への出場を果たし、メンバーの育成や製作ノウハウを維持できていたことも、大会結果に少なからず影響したと思われる。日本勢においては、東海大をはじめ4年ぶりの車両開発となり、メンバーの代替わりが進んだことから経験が少ない中での設計であり、苦戦していたことが見て取れる。

謝辞

東海大学ソーラーカーチームの運営にあたり、東レ、大和リビング、ブリヂストン、裕源、産業技術総合研究所、ミツバ、日本ケミコン、ヘキサゴンをはじめとする学内外の関係者の方々から多くの協力を得た。この場にて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Bridgestone World Solar Challenge (accessed Dec. 4, 2023), <https://worldsolarchallenge.org/>
- 2) Innoptus Solar Team (accessed Dec. 4, 2023), <https://www.solarteam.be/>
- 3) SunPower Maxeon (accessed Dec. 4, 2023), <https://sunpower.maxeon.com/int/solar-panel-products/maxeon-solar-cell-technology>
- 4) Amprius Powered Top 4 Solar Cars in Prestigious World Solar Challenge (accessed Dec. 4, 2023), <https://amprius.com/amprius-powered-top-4-solar-cars/>

- 5) 東レが東海大のソーラーカーに炭素繊維で貢献！50%軽量化、ニュースイッチ (accessed Dec. 4, 2023), <https://newswitch.jp/p/38431>

著者紹介



木村 英樹 (きむら ひでき)

東海大学学長補佐、同工学部機械システム工学科教授、同ドローンアカデミー室長、同ソーラーカーチーム監督、日本太陽エネルギー学会理事・フェロー、循環社会推進協議会 EV 部会長、応用物理学会、電気学会、Society of Advanced Science 正会員、博士 (工学)、専門はエネルギー変換・貯蔵。



福田 紘大 (ふくだ こうた)

東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻教授、博士 (工学)、横浜国立大学助手、University of Maryland (米国)、Faculty Research Assistant、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 情報・計算工学 (JEDI) センター研究員を経て、現在に至る。専門は流体工学、渦流れ、非定常流れ現象、東海大学ソーラーカーチーム監督、日本太陽エネルギー学会、日本航空宇宙学会、日本機械学会、自動車技術会 (技術会議・委員 / CFD 技術部門委員会・委員長 / 流体技術部門委員会・次世代空力ワーキンググループリーダー)、日本ロケット協会会員、米国航空宇宙学会 (AIAA) Senior Member。



佐川 耕平 (さがわ こうへい)

東海大学工学部機械システム工学科講師。前職は富士重工業株式会社 (現：株式会社 SUBARU)。東海大学ソーラーカーチーム総監督。専門は、電気自動車工学、パワーエレクトロニクス、日本太陽エネルギー学会正会員。