

WSC レギュレーションとソーラーカー 関連技術の変遷

Changes in WSC Regulations and Solar Car Related Technologies

木村英樹*

1. はじめに

ソーラーカーの国際大会として、最も長い歴史を有する World Solar Challenge(以下 WSC と略記)は、1987 年に第 1 回大会が開催された。ダーウィン～アデレード間のオーストラリア大陸中央部に広がるアウトバックと呼ばれる砂漠気候帯 3,000 km を縦断する壮大なイベントで、これまでに数年間隔で 16 回が実施された。本稿では、WSC のレギュレーションの変更ポイントと、それに伴うソーラーカーの技術の変遷についてまとめたので報告する。

2. WSC レギュレーション策定の考え方

WSC は、太陽エネルギーを利用するチャレンジであり、黎明期はソーラーコレクター(太陽光エネルギーまたは太陽熱エネルギーを利用するデバイス)を利用することが認められていた。太陽電池はもちろんであるが、熱電素子やスターリングエンジンを利用することも想定されていた。実際に 1996 年にはアイシン精機が太陽電池モジュールに加えて、スターリングエンジンを搭載したソーラーカーを出場させたことがあった。現在は太陽電池の使用

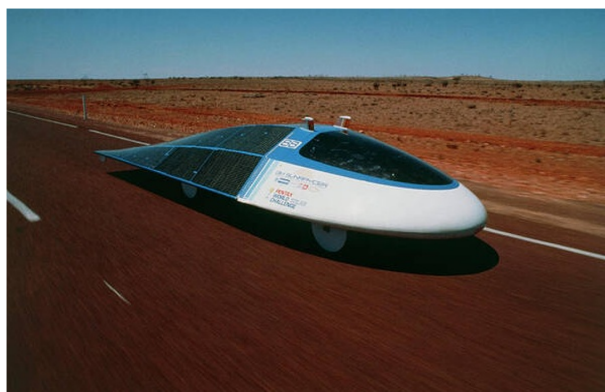


図 1 第 1 回 WSC で優勝した GM Sunraycer¹⁾。

のみが認められている。また、5kWh 程度の容量をもつバッテリーの搭載も認められたが、スタート後の充電は一切認められず、太陽エネルギー依存度を高めている。

2013 年からは、以前からあった 1 人乗りの競技用ソーラーカーをチャレンジャークラスとし、2 人以上が乗車できる、実用化を目指したソーラーカーをクルーザークラスとする 2 クラス混成の大会へと変更された。クルーザークラスは乗車人数、エネルギー効率や搭載スペースの体積などの項目を加えたポイント制となっており、速いだけでは勝つことができない。本稿では、メインクラスであるチャレンジャークラスを中心に説明する。

WSC はオーストラリアの国道 1 号線であるスチュアートハイウェイを舞台としている。ハイウェイといっても、日本人の感覚では交差点や信号がある北海道郊外の一般道のようなイメージに近い道路である。そのため公道を走行するために必要な項目を盛り込んだレギュレーションになっている。大会初期から装備されていなければならないものとして、ブレーキランプ、ウインカー、シートベルト、サイドブレーキなどが規定されている。競技時間は 8 時～17 時であるため、ヘッドライトは不要であったが、2017 年大会からデライトの装着が必須となった。一方、大会開催時期は雨が少ないシーズンが選ばれることが多く、雨天に対応するワイパーは義務化されていない。

3. 車両サイズと太陽電池の変遷

車体サイズは当初、全長×全幅×全高が 6.0 × 2.0 × 1.6 m 以内(かつ全高は 1.0 m 以上)とされた。太陽電池の面積は上方投影面積で 8 m² 以内とされ

* 東海大学 学長、工学部機械システム工学科 教授

ていた。そのため、ステープラーの芯のようなボディの上面と側面に太陽電池を搭載し、実質的には 8 m^2 以上の面積とするデザインも選択できた。このレギュレーションをもとに1993年にホンダ Dream が平均 84.96 km/h の速度で優勝した。この時はSunPower社製のバックコンタクト型太陽電池（平均セル変換効率 21.3% ）が使用された。

その後、世界大会として航空便による輸送を容易にするという目的のために、 $5.0 \times 1.8 \times 1.6\text{ m}$ 以内に縮小された。ただし、太陽電池はこのサイズの範囲内であれば貼り放題というものであった。上方投影面積 9 m^2 のうち、コックピットで 1 m^2 程度が使用されることから、実質的には 8 m^2 の面積を踏襲したものである。このレギュレーションで最速となったのは、2005 WSCで優勝したオランダのデルフト工科大学を中心としたNuon Solar TeamのNuna 3である。三接合化合物太陽電池をボディ上面だけでなく側面にも設置し、 102.8 km/h の平均速度（世界最高記録）を樹立して優勝した。

平均速度が 100 km/h に達することは、巡航速度が 110 km/h に近くになり、スチュアートハイウェ

イの制限速度に到達することを意味する。そうなること、大会運営者などは合法的に前方に出ることができなくなるため、太陽電池出力を抑える方向に舵を切った。そして2007 WSCからは太陽電池のセル面積が 6 m^2 以内となるようにレギュレーションが変更された。この新レギュレーションの下で最速となったのは2009 WSCで優勝した東海大学の09 Tokai Challengerである。太陽電池面積が大きく減少した中で、シャープ製の変換効率 30% の三接合化合物太陽電池を搭載したTokai Challengerは、 100.54 km/h の平均速度記録を樹立して優勝した。2005年のNuna 3の記録にはわずかに及ばなかったものの、 6 m^2 太陽電池搭載車の速度記録として最速となった。

2009年に、またしても平均速度が 100 km/h を越えたことを受けてレギュレーションが変更された。当時は、化合物太陽電池が高価であり、それに含まれるヒ素が有害であるとの理由から、2011年大会は化合物太陽電池の使用が禁止された。このようなレギュレーションの下で、パナソニック（三洋電機）のHIT太陽電池モジュールを搭載した11 Tokai

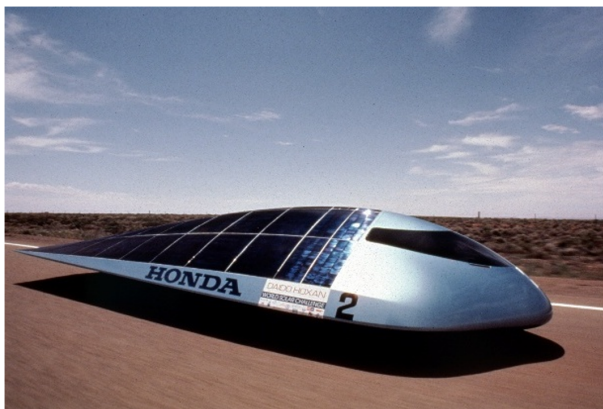


図2 Honda 93 Dream²⁾ .

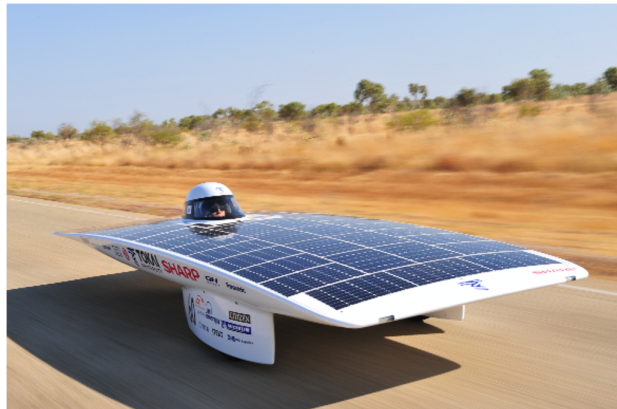


図4 東海大学 09 Tokai Challenger.

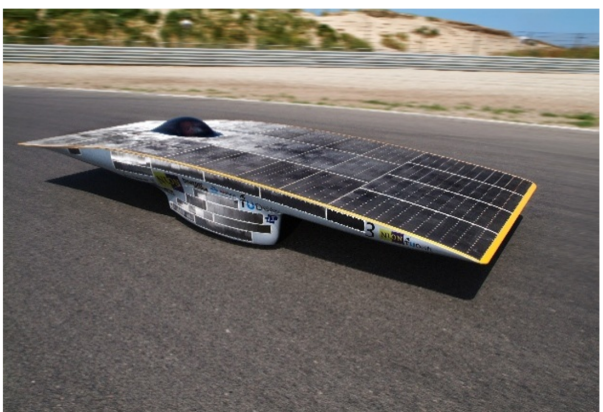


図3 Nuon Solar Team, Nuna 3.



図5 東海大学 11 Tokai Challenger.

Challenger が 91.54 km/h の平均速度を樹立して 2 連覇を達成した。

レギュレーションの大改変はこの頃から 4 年（2 大会）に一度行われるようになる。2013 年には、走行安定性確保のために 4 輪化とコックピットの大型化、全長 4.5 m 以内とするなどの変更が行われた。シリコン太陽電池の使用は堅持されていた。このレギュレーションによって、カタマラン型（双胴型）のソーラーカーが登場することになった。左側に傾斜した 2 次元ルーフが特徴で、空力デザインとして、かなり考え抜かれた形状であった。

2017 年は WSC 開催から 30 年周年の大会となり、これを機に、発足当初の約半分に相当する太陽電池面積を 4 m^2 にまで削減するというチャレンジ的なレギュレーション改定が行われた。ただし、薄膜 GaAs は 3.56 m^2 、三接合化合物太陽電池は 2.64 m^2 までということ、2011 年以降に禁止されてきたガリウムヒ素系化合物太陽電池の使用が再度認められるようになった。これに合わせて、AM15G の波長に最適化した三接合化合物太陽電池が AZUR SPACE 社から登場した。変換効率は 34% に達し、 4 m^2 のシリコン太陽電池と同等の出力が得られた。その結果、化合物太陽電池を選択すると、太陽電池面積が $2/3$ に縮小し、全長が再び 5 m に延長されたため、これらをディザインの空力設計に振り向けることができるようになった。これらの環境下では相対的に小さな太陽電池面積に抑えられる化合物半導体は、シリコン太陽電池よりも有利となった。太陽電池面積が大幅に縮小したことで、新たなボディ形状としてバレット型あるいはモノハル型（単胴型）と呼ばれる形状が出現し、カタマラン型との生存競争が始まった。カタマラン型の代表として、Agoria Solar Team の Blue Point を図 7 に示す。かなりコ

ンパクトな車体に仕上がっていることが分かるだろう。また、バレット型で 2019 WSC で 2 位となった 19 Tokai Challenger を図 8 に示す。19 Tokai Challenger は、17 モデルで先駆けとなったバレット型の形状を踏襲し、シリコン太陽電池搭載車としては孤高の 2 位となった。

2023 年には再びガリウムヒ素系の化合物太陽電池が禁止なる一方で、ペロブスカイト型太陽電池の使用が新たに認められるようになった。また、3 輪化が認められるようになるなど、レギュレーション改定の方向性には一貫性がない。

2025 WSC では、例年 10 月下旬の開催時期が 8 月下旬へ 2 か月早まるという大きな変化があった。南半球に位置するオーストラリアの 8 月ということ、真冬の開催となる。熱中症への対応ということもあるが、筆者はブッシュファイヤー（野火）の影響を避けるという意味もあるのではないかと推測する。2011 年と 2023 年は、火災の炎が路肩に迫る場面もあり、煙にも悩まされた。

しかし冬場の開催となると、日射量は最大で $600 \sim 700\text{ W/m}^2$ に低下することも想定され、単位面積



図 7 Agoria Solar Team, Blue Point.

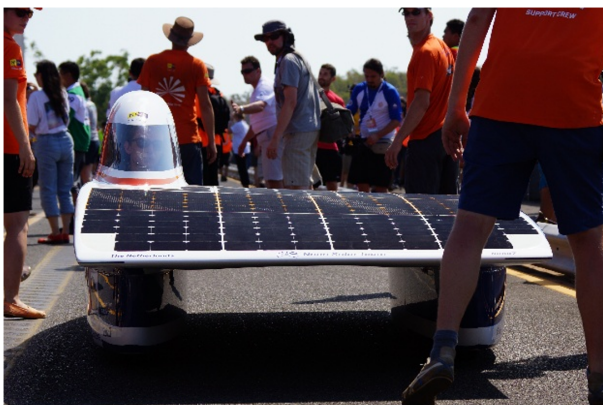


図 6 カタマラン型の一例 (Nuna 7).



図 8 東海大学 19 Tokai Challenger.

当たりの発電量は2/3程度になるのではないかとと思われる。これに対応するレギュレーション変更として、太陽電池面積は6m²に戻され、発電量を回復させる対策が行われた。しかし、日照時間が短くなることから、発電電力量の確保にはどのチームも頭を悩ませることになるだろう。一方、バッテリー容量は従来の5kWhから、3kWhに削減されることになった。バッテリーによるエネルギー調整幅が狭くなるため、天候の影響をこれまで以上に受けやすくなる。従来はバッテリーのSOC変化を少なめに制御することができたが、2025年大会はSOCをいかに最大限に使いこなすかという戦略性が高まると予想される。一步間違えば、電欠によって動けなくなる可能性も高まるので、エネルギーマネジメントの難易度は過去になく困難なものになると予想する。ボディサイズは58×22×6m以内とされ、全長と全幅については開発者の自由度が高められた。

4. バッテリー技術の変遷

初期のソーラーカー用バッテリーはGM Sunraycerをはじめとして酸化銀-亜鉛電池が用いられてきた。重量エネルギー密度は120 Wh/kg程度であった。これが、1999年～2001年頃にかけて円筒型リチウムイオン電池に置き換わっていった。重量エネルギー密度は、当初120 Wh/kg程度であったものが、200 Wh/kgを越えて250 Wh/kg程度に到達した。

ラミネート型のリチウムイオンポリマー電池も登場し、選択肢が広がっている。また、リン酸鉄型リチウムイオン電池は、その名が示す通り、正極にリン酸鉄(LiFePO₄)が用いられ、重量エネルギー密度が他のリチウムイオン電池と比較して低くなる一

方で、結晶構造が壊れにくく安定しており、過放電、過充電状態においても熱暴走が発生しにくい。このことから、2021年のWSC(COVID-19の世界的な流行により中止)では、レギュレーションで、40kgの搭載が認められていたが、正味185 Wh/kg程度のエネルギー密度が得られることから、2023年WSCでは、最大36kgに変更された。

2023年大会は、シリコン負極を採用したラミネート型リチウムイオン電池が登場した。この新型リチウムイオン電池は、320 Wh/kg～500 Wh/kgと他のリチウムイオン電池の1.5倍程度の重量エネルギー密度を有しており、1位から4位までのチームがこのリチウムイオン電池を採用していた。

2025年WSCのバッテリーレギュレーションでは、重量規定から、容量規定へ変更された。Challengerクラスでは、最大11MJ(約3kWh)とされ、エネルギー量で制限されることから、重量差または、容積差は発生するものの、選択する電池の種類による搭載エネルギー量は変わらないことから、電池の選択による車両の性能差は少なくなった



図9 円筒型18650リチウムイオン組電池。



図10 ラミネート型リチウムイオンポリマー電池と円筒型リン酸鉄型リチウムイオン電池の外観。



図11 リチウムイオン電池の釘差し試験。

といえる。

バッテリーのエネルギー密度が高くなるにつれ、安全面に関する規定も定められてきた。初期の大会においては、バッテリー状態の監視に関する規定はなく、エネルギーマネジメントの観点から、バッテリーシステム全体の電圧および電流を計測する程度であった。セルあたりのエネルギー密度が高く、過充電および、過放電による熱暴走からの火災につながるリチウムイオン電池の登場により、バッテリーシステムの監視が求められるようになった。

図12は、Tokai Challengerに搭載した、バッテリーマネージメントシステム（BMS）である。初期のBMSは、リチウムイオンバッテリーのセル電圧を監視するにとどまっていた。セルの電圧のばらつきを監視し、電圧バランスが著しく崩れるものがある場合、外部から、該当セルに対し抵抗等で放電している。

また、2019年ごろのWSCから、積極的なバッテリー保護を規定で求められるようになってきた。このころより、BMSは、セルの電圧監視だけでなく、バッテリー保護目線による充放電電流の監視および、

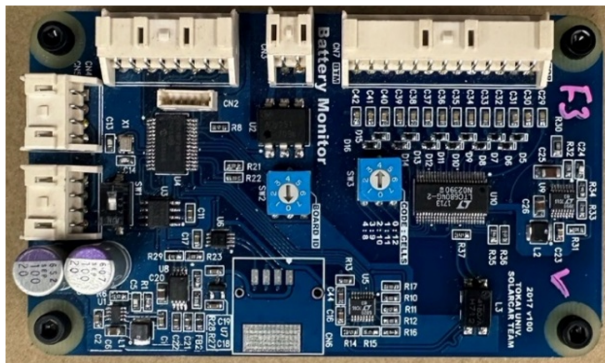


図12 バッテリーマネージメントシステム（BMS）。

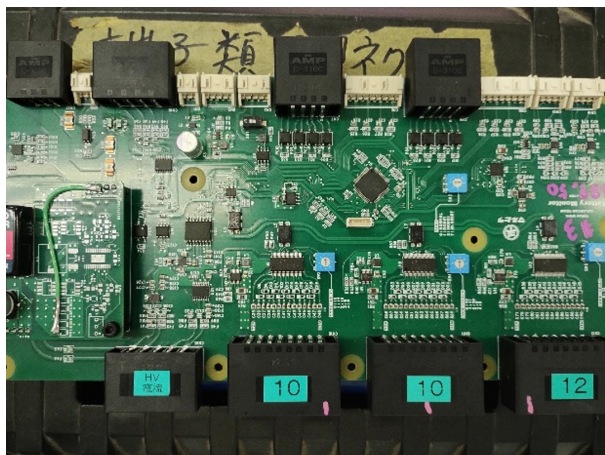


図13 統合型バッテリーマネージメントシステム。

制限機能が求められるようになった。規定に準拠するためには、BMSによる高電圧リレー系統の制御機能が付加され、高電圧供給前に車両側に異常が発生していないかなどの確認を行った後に、高電圧リレーをBMSが駆動し、車両に高電圧を供給する必要がある。また、太陽電池側のリレーについてもBMSが直接または、間接的にコントロールする必要があり、車両側にバッテリーが高電圧を供給させていない場合には、太陽電池側リレーのコンタクトは、オープンを保つ制御が組まれている。

また、何らかの異常が発生した場合には、BMSがシチュエーションに応じて各高電圧リレーの開放を制御しており、バッテリーの監視保護機能というよりは、車両全体の電氣的安全を担う中核のコントロールユニットといえる。

5. タイヤの技術変遷

ソーラーカーの太陽電池で発電される電力は、 4m^2 で約950W程度であり、荒野で時速90km以上の巡航速度を維持するためには、走行抵抗を極限まで減らすことが不可欠である。このうち、車両重量や、空気抵抗については、材料や形状の工夫によりチームである程度までは削減できる。一方で、転がり抵抗係数の低いタイヤについては、製造ノウハウや製造装置が特殊であることから、トップチームであっても、独自に開発することは事実上不可能である。

初期のソーラーカーは、比較的軽量で転がり抵抗係数の低い自転車タイヤのチューブに6気圧程度の空気を入れるなどの対応を行ってきた。そのため初期のWSCでは、チームメンバーが先回りしてキャトルグリッド上に板を敷くといった作業が行われて



図14 高電圧車載EVリレー。

いた。大会のレベルが向上するにつれて、より転がり、耐久性があり、かつ安全なソーラーカー専用のタイヤの登場が求められるようになってきた。1996年のWSCでは、Michelin社がソーラーカー専用のラジアルタイヤ 65/80R16を開発し、限られたチームに供給された。その後、公道走行への対応を考慮した溝付ラジアルタイヤ 95/80R16の供給が開始された。

自動車用タイヤ開発の歴史からは、1930年代後半からミシュランがラジアルタイヤの開発を開始し、1946年に特許申請。その後、1951年に市販車への装着が始まった。この技術により、転がり抵抗の低減と長寿命化を実現した。ラジアル構造は、接地幅を広げて接地長を縮めることで、タイヤの変形を小さくし、ヒステリシスロス小さくすることができる。ソーラーカー黎明期は、それに対応するサイズや荷重負荷に最適なものがなかった。そこで、地面との接地面積が小さい自転車用バイアスタイヤに高めの空気圧を入れる方法が最も良いと考えられていた。2019年よりWSCのタイトルスポンサーとなったBridgestone社も2013年よりソーラーカー



図15 Michelin社ソーラーカー専用ラジアルタイヤ。

専用タイヤの開発および供給を開始した(図16)。

ソーラーカー用タイヤは、ゴム素材(天然ゴム、合成ゴム)、コンパウンド(シリカ系など)、カーカスコード(スチールワイヤー、ナイロンコード、ケブラー)、添加剤などを組み合わせ、できるだけ少量で構成した方が転がり抵抗は小さくなる。しかしながら、耐パンク性能とトレードオフ関係になるため、バランスを取ることも重要な開発ポイントとなる。

Bridgestone社は、OlogicやENLITENといった転がり抵抗低減技術や、再生材量の割合を増やし環境負荷低減技術を導入し、車両性能だけでなく、環境性能を高める開発を進めている。また、過酷なオーストラリアの路面環境に耐える耐久性についても、世界で唯一のソーラーカー専用コースで知られる、秋田県の大潟村ソーラースポーツラインを使用し、WSCに参加する国内ソーラーカーチームと合同でタイヤ評価耐久試験を実施しており(図17)、ソーラーカーチームからの実走行データが、専用タイヤの開発にフィードバックされている。

Bridgestoneは、ここで開発されたタイヤを、WSCへ参加使用を希望する全チームへの供給も行っており、環境性能と耐パンク性能の向上と、転がり抵抗の低減でソーラーカー活動を支援している。

6. まとめと今後の展望

1987年の初開催以来、World Solar Challengeは、省エネルギー自動車の性能向上と技術者育成に多大な貢献を行ってきた。先端技術のショーケースとしての役割は、今後も継続されると期待される。一方、日本国内ではソーラーカー大会の数やチーム数が減少している。世界に対抗する省エネ技術の基礎研究として位置づけ、今一度ソーラーカー開発を国内で



図16 Bridgestone社製ソーラーカー専用タイヤ。



図17 新型タイヤテスト中のTokai Challenger。

加速する必要があると考える。

参考文献

- 1) Bill Turckey, Sunraycer (1989) Chevron Pub. Group.
- 2) Press Kit (1993) Honda.

著者略歴



木村 英樹 (キムラ ヒデキ)

東海大学学長

博士 (工学).

東海大学工学部機械システム工学科教授. 東海大学ドローンアカデミー所長.

専門はエネルギー変換・貯蔵. 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. 東海大学ソーラーカーチーム監督.