WSC におけるレギュレーションの進化

The Evolution of Regulations for the World Solar Challenge

逸見紀夫 *

1．はじめに

ワールドソーラーチャレンジ（以下 WSC）は 1987 年に第 1 回大会が開催されて以来，名実共に世界最高峰の大会として世界中から出場するハイレベルなチームが競い，多くの新しい技術が投入されると共にそのレギュレーションもまた進化を遂げてきた．第 1 回大会の優勝記録は 8 m^2 の太陽電池を用いて平均時速 68 km/h であったが，2017 年大会ではわずかその 1/3 の 2.65 m^2（化合物多接合セル）で平均時速 80 km/h 以上を達成するまでに至った．開始から 2005 年大会まではとにかく 3000 km を完走するという事に主眼が置かれていたが，技術の大きな向上もあり 2007 年以降は安全性や将来的なソーラーカーの実用化を見据えて，乗車姿勢や搭乗者のためのスペースなど走行性能にマイナスになるような規定も追加され方針が大きく変更された．さらに実用化を加速するため 2013 年大会から乗車定員が 2 名以上の車両で競われるクルーザークラスが新設された．

レギュレーションの前文でもうたわれているように WSC の本質は設計競技であり，特に近年は上位の実力が拮抗しているため，ルール内で最大限の車体性能を引き出すため，英文で発行されるレギュレーションの理解がますます重要となっている．また WSC 以外の多くのソーラーチャレンジにおいても車体規格やレギュレーションは WSC の最新版を元にしているものが多く WSC 規格がデファクトスタンダードとなっているため，本稿では WSC に絞ってこれまでの技術とレギュレーションの変遷，過去に利用されたレギュレーションの不備，最新レギュレーションの解釈のポイントや注意点等について解説する．

2．技術とレギュレーションの変遷

WSC は全区間公道上で行われる競技であるため，大会規則と共にオーストラリアの交通法規の統治を受ける．よって南オーストラリア州では最高時速は 110 km/h 以下に制限されるため車体性能の向上によって平均時速が 100 km/h を超えると車体性能差以外の要因が大きくなり設計競技として好ましくないため，その度に発電量の削減や走行抵抗が増えるような変更を何度も行い平均時速を下げる方向でレギュレーションが改定されてきた．

それ以外にも，規則の不備をついて性能向上やアドバンテージを得ようしたりするケースや，競技中発生した新たな問題に対応したりするため毎回新しい規則の追加や厳格化がなされた結果，2011 年大会では 39 ページだったレギュレーションが 2019 年度版では 69 ページにまで膨れ上がっている．

2.1　車体規格

近年の大きな変更は 2013 年の 3 輪（規定無し）から 4 輪義務化への変更と同時にクルーザークラスが導入されたこと，ならびに 2017 年にソーラーセル面積が大きく変更されたことなどである（表 1）．

Table 1　車体規格の変遷（括弧内はクルーザークラス）

年度	太陽電池		車体寸法（全長×全幅）
	シリコン	化合物多接合	
2009	6 m^2	6 m^2	5.0×1.8 m
2011	6 m^2	3 m^2	5.0×1.8 m
2013	6 m^2 (6 m^2)	3 m^2 (3 m^2)	4.5×1.8 m，4 輪
2017	4 m^2 (5 m^2)	2.65 m^2 (3.33 m^2)	5.0×2.2 m，4 輪

*Technical Officer, University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Science
Adelaide, South Australia, 5005 Australia
e-mail：norio.itsumi@adelaide.edu.au

4 輪化初年度の 2013 年は多くのチームがそれまでの 3 輪型のコンセプトをそのまま 4 輪化したようなセンターコクピットの車体で臨んだが，東海大と Nuon は空力解析の結果からいち早くカタマラン（双胴）型の車体を導入し 1 位，2 位を独占し優位性を示した結果，翌 2015 年大会ではこれが標準となった．さらに 2017 年大会では太陽電池の面積削減よる発電量の減少を補うため，車体サイズの自由度が全幅 2.2 m ×全長 5.0 m に緩和されると共に化合物セルの面積制限がこれまでの対シリコン比 50 %から 66 %に緩和されたことで化合物セルの発電量がシリコンセルに匹敵するレベルとなり選択肢として復活し，上位にも異なるコンセプトの車体があふれた．

2017 年の優勝チームである Nuon は同等の発電量でパネル面積を小さくできる化合物多接合太陽電池を使用して全長わずか 3.3 m（2015 年型は 4.5 m）の非常にコンパクトなカタマラン型車両（Fig. 1）を製作した．前方投影面積削減よりもむしろ全長を短くして空力抵抗係数を極限まで小さくするアプローチだと考えられる．大会結果からも空力性能の高さがうかがえるが，サーキットでの練習走行でも風切り音がなくタイヤの音以外ほとんど何も聞こえないという異様な光景であった．従来のシリコンセルを使用した通常サイズのカタマラン型も引き続き多くのチームで採用され，Twente や西シドニー大などが好成績をあげた．一方ミシガン大，東海大（Fig. 2），工学院大は単胴（モノハル）型の車体を採用した．全長の制限が 5 m に緩和されたことにより細長いカヌーのような単胴の車体に全てを収めるタイプである．車体下部のトンネル部分が無いため空気の流れを最適化しやすく，横風時の空力性能低下が起こりにくい利点がある．こちらもミシガン大が 2 位，東海大が 4 位（シリコンセル使用チーム中トップ）と上位入賞でモノハル型の可能性を示した．ただ 1 位～ 3 位がすべて計 3,000 万円以上する化合物セル使用チームで占められたことは大会の精神からして決して好ましいことではなく，2019 年大会に向けて化合物セルの換算比率の調整を望む声もあったが規定の変更は行われなかった．やはり設計競技という観点から最低でも 2 大会は同じ規格で進化を見たいということだろう．

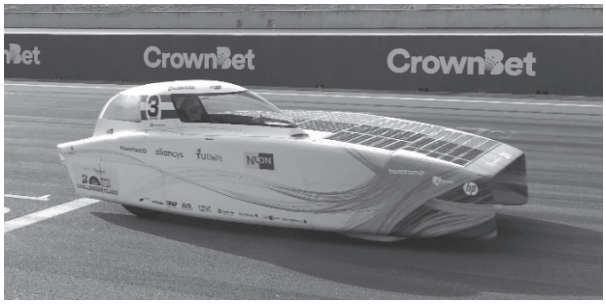

Fig. 1　コンパクトカタマラン型の Nuna9（デルフト工科大 Nuon Solar Team）

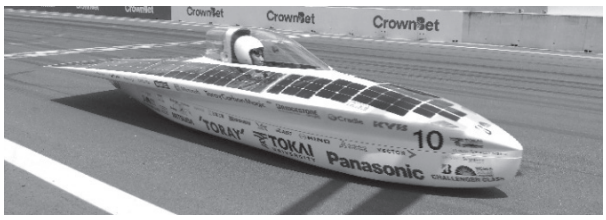

Fig. 2　モノハル型の Tokai Challenger 2017

2.2　電気系

前述のように使用可能なエネルギー量を簡単にコントロールできるため，パネル面積の変更は過去から頻繁に行われてきたが，面積以外にも近年ソーラーセルに関して集光デバイスをめぐる攻防が繰り広げられ多くの規定が追加された．2013 年に Nuon がレギュレーションの不備を突いて外部充電パネルを導入して優勝（詳細は 3 章）した結果，集光器に関して段階的に規制が追加され，2017 年には集光器の開口面積がソーラーセル面積に合算されるように変更された事でメリットを失い完全に姿を消した．一方，安全面に関しても発火や感電事故などを防ぐために変更が加えられている．それまでも高電圧系のブレーカーなどの規定はあったが，2015 年からはよりフェイルセーフに重点を置いた電気系セーフモードが定義されるとともに，バッテリー火災時に有毒ガスや液体からドライバーを守るための規定が追加された．また灯火類やホーンなどの保安部品の基準も強化された．

このように電気系に車体規格では前述のセル面積以外に関しては安全をさらに強化するための変更が多かったが，技術に関して色々と新しい物が投入されている．WSC では平地での巡航が中心であり，低負荷高回転での効率が重視されるため，鉄損を削減する為に CSIRO がコアレスモーターを開発し，ミツバはヒステリシスの少ない鉄系アモルファスコアのモーターを投入した．2017 年以降はさらに巡航時の電力が下がったため，通常のケイ素鋼板コアを選択した名古屋工大でも低負荷領域の鉄損削減のためコアの容積が小さい定格 1 kW タイプのモーターを選択し予選 2 位，本戦完走を果たした．発電系に関しても損失を減らすため，ソーラーパネル表面材にモスアイや微細ピラミッド構造を利用した反

射防止加工，パネル毎の角度のばらつきや陰などの影響を低減するための分散型 MPPT，さらに細かい単位で陰の影響を軽減する PV バランサーなど新しい技術が競って投入され面積あたりの発電量増加に貢献している．

2.3　メカニカル系

2017 年以前は旋回半径の要件として，縁石間 16 m のレーンで U ターンできるという規定があった．空力性能を考えるとスパッツやタブの幅は狭い方が好ましいためいくつかのチームが旋回時に二つに割れて開くスパッツや後輪操舵を装備してスパッツやタブを細くできるよう対応した．後輪操舵は実際には車検用であり素早い動作が不要なため，モーターを利用した電動の物が多かったようであるが，2017 年から旋回半径の規定が安定性試験に統合され，外径 22 m の 8 の字コースを 9 秒以内で走るという試験が課されることとなった．旋回半径は緩和されたものの，制限時間が短く素早い応答が要求されるため電気式 4WS での対応が難しく，またホイールベースも短くなったこともあって 4WS を使用せず対応するチームも多かったが，工学院大はステアリングと連動したシリンダを使用した油圧式，Punch Powertrain はジェネバ機構を利用した機械式の 4WS を実装して対応した．どちらも見事な設計であり，フルテア近傍でのみ後輪が操舵されるようになっている．ブレーキに関しては 2017 年から 4 輪すべてにかかることが義務付けられた．規則とは直接関係ないが，2017 年は車速が落ちることで転がり抵抗の比率が増したこともあって，Nuon, Punch Powertrain, Twente は軽量化に注力し車重をバッテリー込みで 140 kg 台に収めてきた，中でもシリコンセル使用のフルサイズカタマラン型である Twente がその重量を実現したことは見事であった．車体の安定性に関して 2017 年大会ではモノハル型でトレッド幅のかなり小さい車両があったが，練習中の横転事故が複数チームで発生しており将来的にトレッド幅の下限が設けられるかもしれない．

2.4　競技規則

競技の形態に関しては近年のチャレンジャークラスでは大きな変更は行われていないが，2017 年大会からコントロールストップにおいて他のクルーによるサポートが制限されるようになった．コントロールストップではドライバー 1 名のみがソーラーパネルのリコンフィギュレーション（ルーフを太陽の角度に合わせて立てる）を行えるよう制限され，コントロールストップの計時中は車体に触れてはならなくなった．そのためルーフの開閉はドライバー 1 人で素早く行えるように設計する事が必要となり，ルーフの軽量化や開閉機構の設計が重要となった．今後はコントロールストップでの停車時間を短縮するため太陽センサとアクチュエータを利用したような自動開閉機構の登場も予想される．

またコントロールストップ中に限らずパネルを冷却するための外部からの散水が一切禁止された．これはチーム毎のリソースによる差や，実際にソーラーカーが実用化された際に停車毎に散水で冷却するのが現実的ではないことなどが理由だと考えられるが，散水禁止はただでさえ有利な化合物セル使用チーム（高温での効率低下が少ない）をさらに利することになるので疑問が残る．

停車時にソーラーカーの下に敷いて使用するグランドシートについても規制が加えられることとなった．以前からソーラーセルへの照度を増やす外部デバイスは禁止されていたが，単なるシートであるとして明るい色の物をソーラーセル側にはみ出すように敷いて発電量増加を狙うケースが続出したため，2017 年大会ではソーラーセルへの照射量を増加させる物であってはならないと明記された．Twente は色指定が無いため，白色のシートを持ち込み車検時に主催者から使用許可を得て競技中使用していそうである．ところが競技途中で使用禁止を言い渡されそれ以降は使用を中止したものの，競合チームが 1 日目にペナルティ目的で撮影した写真を根拠に抗議を行った結果 Twente に 30 分のタイムペナルティが言い渡された．実際に反射を狙ったことは明らかであり自業自得とも言えなくはないが，一度 OK を出した物に対してペナルティが課されたことには同情の余地がある．「白い物を使うのは自由であるが，照度を増加させて良いとは言ってない」ということなのだろう．このようなすっきりしない一貫性のない裁定は WSC のような世界最高峰の大会でもよくあるので参加チームは留意されたい．この件を受けて 2019 年大会ではグランドシートの使用はコントロールストップでは一律禁止され，キャンプ地では整備作業などに必要なので使用自体は許可されるが，ソーラーパネルの接線上にグランドシートがかかってはならないよう変更された（Fig. 3）．写真を撮られてペナルティを受けないためにも，充電中はシートを使用しないか，使用する場合は一瞬たりとも禁止されている状態にならないよう気をつける必要があるだろう（水溜りや塩湖など反射率の高い自然地形の使用に関しては現在の所レギュレーション

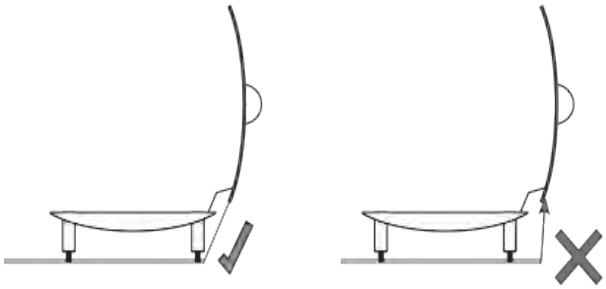

Fig. 3　グランドシートの使用可能な範囲

上の規制をうけない）.

2.5　クルーザークラス

クルーザークラスでは4輪で2名以上が乗車出来る車両で行われる．2013年の開始当初は所要時間，エネルギー使用量（外部からの充電量），実用性審査，Person*km （乗車人数×距離）を元に計算された得点で勝敗が決定された．2015年大会でも基本的に2013年大会のルールが踏襲されたが，所要時間の配点が70 %と大きくなった為，工学院大が空力性能を追求した低ボリュームの車体に1名乗車という戦略で望んだ結果，チャレンジャークラスの中団有力チームをも脅かす速さをみせた（バッテリー容量が倍で，1回外部電源からフル充電が行えるので単純比較はできないが）．ところが，アリススプリングを出発してすぐに後方から追いかけてきたオフィシャルから車体がふらついているという理由で規則にない不可解な速度制限を課されることとなった（チャレンジャークラス上位でも突風でふらついて一瞬センターラインを超えるようなケースは多々ある）．その後，抗議の結果速度ペナルティは解除されトップでゴールしたものの実用点で逆転され，2位に終わった．これがきっかけとなって，2017年大会からはクルーザークラスはレース形式を取りやめ，指定された時間帯にゴールへ到着する規則トライアルとなった．新しい規定では人数×距離を使用した外部電力（出発時のバッテリーを含む）で割ったエネルギー効率で競われ，これに実用性審査の得点を加えた合計点で順位が決定されるよう変更された．ところが翌2017年大会は多くのチームが進行をうまくコントロールできず，時間通りゴールして効率点を獲得できたのは参加15チーム中わずか3チーム（残りのチームは効率点0点）だったため，2019年大会では途中2箇所のステージポイントで分割された3ステージ制に変更され，ステージ毎に到着時刻を設定してこまめに進行をコントロールできるよう変更された．また安全面もしくは健康面からか2019年大会から座席数に関わらず最大搭乗人員は4名までとなった．さらに将来の実用化を見据えて充電はステージポイントのみでType 2（AC）の電気自動車用充電器から行なえるよう変更さた．またその際の外部充電量は充電器での実測値が使用され，充電所用時間も実用性審査に考慮されるようになった．

3．レギュレーションの解釈をめぐる攻防

近年の大会では車体性能が均衡しているせいかレギュレーションの不備を巧みに突くようなケースが続出した．ここでは実際に規則の不備を突いて大きなアドバンテージを得た3つのケースを紹介する．どれも一見無理筋のように感じられるかもしれないが，実際に車検で認められたものばかりであり，近年のトップチームは僅差の相手に勝つためにこのレベルまで攻めた解釈を行っているという参考例として捕らえて欲しい．決してずる賢いやり方を推奨するわけではないが，自分たちがやらなくてもレギュレーションに不備があれば相手チームは必ずこれくらいのことをやってくると覚悟しなければならない．

3.1　Nuonによる外部充電パネルの使用（2013年）

発端は2011年に化合物セルの面積がシリコンの半分に規制されたことにはじまる（これによりシリコンセルよりも総発電量が大幅に低くなった）．当時の規則は「ソーラーカーの車体で直接受けた自然光のみ使用可能」となっていたためスポンサーがらみで化合物セルを使用せざるを得ないUmicoreチームは，不利を補うため2011年大会でセルの一部に集光器を組み込んだ車両（Fig. 4）を製作し出走を許可された．

翌2013年大会の規則にはこのケースを追認して「集光を行うデバイスはそれらが恒久的にソーラーカーの一部であり，かつソーラーカーの寸法が**いかなる時も**許容サイズを超えない場合使用できる．」という規定が書き加えられた．ところがNuonはこの規定を逆手にとって余剰となった端数のセル面積分を利用して1 mm以下に小さく分割した多数の化

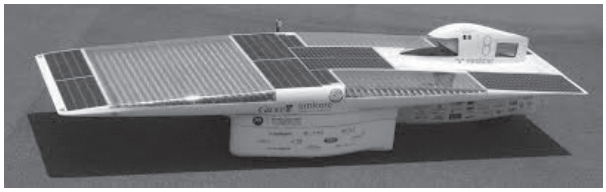

Fig. 4　集光器が組み込まれた車両（Umicore Solar Team）

Fig. 5　外部パネルによる充電（Nuon Soar Team）

合物セルと集光レンズを組み合わせた外部充電パネルを導入したのである（Fig. 5：停車時のみの使用であるが最大で 500W 程度の効果があったとされる）．なぜこんなものが認められてしまったかであるが，この集光器付き外部パネルを走行時に車内に積み込むことで，恒久的に車体の一部であると主張したのである．また寸法規定の「いかなる時も」には充電時も含まれると解釈するのが自然であるが，当時の車体サイズ規定は直線走行時の形状で規定されており，停車時にルーフを取り外して延長ケーブルを使用して本体から離れた日当たりのいい場所で充電する行為は当たり前のように行われていた．充電時に車体の一部であるルーフを別の場所に設置していいのに，同じく車体の一部である集光パネルを展開してはいけないのはおかしいという論理であろう．結局主催者は新しい発明として好意的に受け入れ許可することとなったが競合チームからは当然異論が続出し，その後の大会ではこのアイデアは制限される方向で規則が追加されていくこととなった．

3.2　Nuna7 の視界要件適合性（2013）

2013 年には車体規格が大きく変更されたが，それに加えてそれ以前は車検員が満足するという抽象的だった視界要件が「ドライバーの目の位置から 4 m 離れた上下 70 cm の前方すべての点が視認できること」という厳密な規定に変更された．同じカタマラン型車両の東海大学は前輪がドライバーの足の間に来るくらい運転席を前方に移動することで正しい運転姿勢のまま視界要件を満たす設計を行ったが，空力設計上なるべく運転席を後方に配置したかった Nuon はレギュレーションの不備を突き一見視界要件を無視したようなロングノーズの車両を持ち込んだ．レギュレーションでは視界については前述のとおり細かく記載されていたのだが，ドライバーの着座姿勢やヘルメットの装着の有無についての記述が一切なかったのである．つまりベルトを外してヘルメットを脱いだ状態で中腰になり頭がキャノピーに着くような姿勢で前に乗りだしてでも見えればいいだろうという解釈である．これに関しても競合チームから異論が寄せられたが，最終的にはお咎め無しとなってしまった．これを受けて翌 2015 年大会からはヘルメットとシートベルトを着用して運転姿勢で着席した状態という規定が追加されるとともに，厳しすぎる下方視界要件については 40cm に緩和されることとなった．

3.3　前部標識エリア（2013,2015）：

WSC では車体の前部にチーム名，車名，大会ロゴなどを表示する標識エリアが義務付けられているが，2013, 2015 年大会は車体サイズが 1.8 m × 4.5 m と 6 m^2 のソーラーセルを貼るにはあまり余裕がなく，キャノピーの影の影響をなるべく避け効率よくソーラーセルを貼るために各チームともこの標識エリアはなるべく小さくしたいところであった．2013 年の標識エリアは「1500 mm × 300 mm の欠けのないエリア」と今よりはかなり大きなサイズであり「300 mm × 300 mm のイベントロゴを貼る場所を**確保しておくこと**」「団体名，チーム名，国籍をリーディングエッジに表記する」などの規定があった．多くのチームは車体のリーディングエッジに沿って曲げるなどしているが規定サイズの専用エリアを設けて対応した．ところが Nuon はこの規則をまるで無視したかのような標識用のスペースがほとんどない車両（Fig. 6）を製作した．Nuon の主張はおそらくこうである．「我々は規定の標識エリアをちゃんと確保している．ただし標識エリアにもソーラーセルを貼りはしたが．」実際に小さめの文字で規定の項目は記載されており，大会ロゴステッカーに関しても，スペースを準備するだけで貼れとは書かれていないので，セルの上に貼ることが出来るが貼らな

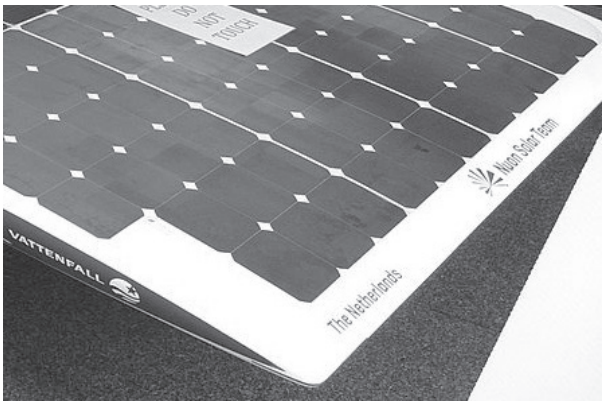

Fig. 6　Nuna7 の標識エリア（ソーラーセル 1 個が 125 mm）

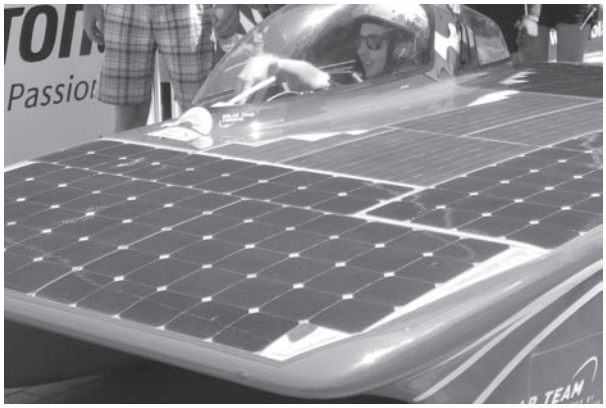

Fig. 7　Twente One の標識エリア

いだけで問題はないという解釈である．

実際にこの主張は認められ，それを受けて翌2015年大会では標識エリアのサイズが現実に合わせて小型化された上で，「標識エリアにはソーラーセルを含んではならない」という項目と，他にも「**前部標識は車体の複合曲線に沿って折り曲げる事ができるが左右の距離は600 mm，上下の距離は150 mm以下であってはならない**」という規定が追加された．これは2013年大会でリーディングエッジの曲面に標識エリアを設けるチームがあった事を受けての追加であるが，2015年大会でこれを逆手にとったTwenteが標識エリアを何と車のではなく，キャノピーのリーディングエッジに配置したのである（Fig. 7）．

たとえキャノピーのフィレットに沿って配置してもU字型になるため左右の600 mmは満たしてないように見えるが，車体をよく見ると標識から離れた座席の横あたりに文字が書かれており，ドライバーの真横あたりまでを標識エリアとすれば確かに端から端まで600 mmを確保できている．これは実際に車検でも認められ，車体前端ぎりぎりまでソーラーセルを配置することができたため，キャノピーの周りに大きな空白スペースを設けることで陰の影響を受けにくいというアドバンテージを得ることができたが，真面目に規定のスペースを設けたチームはパフォーマンス面で不利益を受けていたわけである．2017年大会では標識エリアの定義が厳格化され，またセル面積が大幅に削減され余裕ができたこともあり，このような裏技的なものは見られなかった．

4．最新レギュレーションの解釈

WSCに参加するためにはレギュレーションに合致した車両を製作し，規則に沿って運用する必要がある．前章でも述べたように近年太陽電池面積が削減され，完走自体の難易度が上がってきている状態であり，少しでも車体性能を向上させるためにはレギュレーションが認めるぎりぎりの所での設計が必要となる．その為にはレギュレーション上何がよくて何がダメなのか，一字一句読み解き完全に理解することがとても重要である．筆者は2015年よりWSCレギュレーション全文の日本語訳を行ってきた．これは自分自身が規則を隅々まで理解すると同時に母国である日本のチームに何か貢献できないかということで始めた活動でもある．2015年大会後翻訳版の配布について主催者に問い合わせポジティブな反応を得ていたが，改めて2017年版に対し正式な配布許可を求めた際には回答が得られなかったため，現在はあくまで各チームが翻訳版の作成主体となってもらい翻訳作業を請け負うと言う形をとっている．参加チームや参加検討を行っているチームには無償での翻訳リソースの提供が可能であるので必要があれば利用してほしい（詳細は記事末尾「アデレードソーラーカー研究所」まで問い合わせのこと）．本章では最新のレギュレーションを使用して特に解釈の難しい点や注意すべき点を中心に解説を行う．

4.1　車体系

車体まわりで特に気をつけなければいけないのは，視界要件，ナンバープレートの視認性，バッテリーの換気，搭乗者セル，ブレーキ，二重絶縁などである

(1) ナンバープレート（Reg.2.6.2）：ナンバープレートの位置は空力上の観点からキャノピー内など車体の透明な部分の内側に取り付けるのが望ましいが，2019年からプレートの視認要件が規定の角度のすべての位置から全部の文字が完全に読めるよう厳格化されている．特に気流の剥離防止のためにキャノピー後端がシャープな形状になっている場合はエッジ部分が重なって文字が読めなくならないよう注意が必要である．

(2) バッテリーの排気（Reg.2.5.15）：規則ではエネルギー貯蔵パックが故障時に有毒ガスを出す可能性がある場合は，ガスをドライバーより後方の車外に排出できるよう設計しなくてはならないと規定されている．リチウムイオン電池については類焼した場合も有毒であるCOやフッ化水素などの発生は微量であり毒性は限定的だと筆者は考えるが，実際の車検ではリチウム系蓄電池を使用する場合は必ず要求されるのでバッテリーの位置によってはアルミダ

クトなどを設置して対応した方がいいだろう．また規則では明記されていないが，停車時にも後方に排気できるよう吸気側にファンが必要である．（排気側だとバッテリー火災時高温になるためファンが溶けてしまうので注意）

（3）ブレーキ（Reg.2.21）：規則ではブレーキは独立した常用ブレーキと副ブレーキの二種類が必要と記載されている．この規定が登場した 2015 年大会ではレギュレーションで具体例が示されなかったため実際に完全に独立した二種類のブレーキを装備したり，パーキング用のキャリパーを設けたりしたチームもあったようだが過剰である．2019 年大会のレギュレーションでは補足が追加されているが，以前より故障に寄与しない部品について条件を満たせば共用することが出来る規定になっており，実際の最も理にかなったブレーキ構成は，前輪用と後輪用のそれぞれのマスターシリンダーを用いた前後 2 系統のブレーキを 1 つのペダルで操作する形となる．両方のブレーキが正常に働いている場合が常用ブレーキとなり，どちらかが故障して前二輪もしくは後二輪のみが働く状態を副ブレーキと見なす事で，規定を満たすことが出来る．パーキングブレーキについても，フットペダルを固定するラッチ式のハンドブレーキ機構を追加して，ペダルを踏んだ状態で固定することで達成できる．

（4）灯火類（Reg.2.24）：ウインカー，ブレーキランプなどの灯火類に関しては，以前は昼間遠くから視認できると言うような抽象的な規定であったが，2017 年から UNECE もしくは SAE/DOT と同等であることが義務付けられた．UNECE では各灯火の光度（cd）の規定がヘッドライトとの距離などの条件により複数のカテゴリに分けて規定されている．認定マーク入りの物であれば適合性が保証されるが，チャレンジャークラスでは空力をわずかでも向上させるため車体に合わせた形状の物を高輝度の LED 等で自作することになるだろう．その場合は認証エンジニア（日本の場合は技術士など）により UNECE や SAE/DOT の測光要件を満たすことを証明する必要があるが，光度は照度と距離から計算で求める事ができるので作成した計算書に工学博士や技術士である顧問やアドバイザーの署名をもらうことで要件を満たすことができるだろう（光度基準や測定方法等の詳細は UNECE,：Reg6，Reg7 等参照のこと）．

（5）音響警告装置（Reg.2.25）：以前は音量のはっきりした規定はなかったが 2017 年以降は 2 m の位置で 105 dB 以上（A 特性）の音圧が必要となった．これは市販自動車程度の音量であり，電磁式の量産部品を実装する場合はホーンのみでピーク時 5-7 A 程度の電流が流れる事になる．WSC では補機用バッテリーは認められないので大容量の DC/DC コンバーターを使用するか，余剰のリチウムイオンセルを 3 本使用してフローティングするなどしてピーク時の電流容量を確保するかエアタイプの物を使用する必要がある．大容量の DC/DC を使用した場合通常の低負荷時（1 A 以下）の効率が大きく低下するため，弊チームでは常用の 2 A 程度の小型コンバーターに加えて通常 OFF でホーン使用時とコンタクター ON 移行時のみ使用する 7 A 程度のものを並列に設けている．

（6）搭乗者のための空間（Reg.2.11-13）：これらの項目は直接的にキャノピーの大きさに影響を与え空力性能に直結するため特に規則の理解が重要である．黎明期ではボディーの隙間に寝転ぶような運転姿勢が許可されていたが，現在ではチャレンジャー，クルーザー両クラスとも安全と実用面から，”小型自動車設計改造のための実務規範セクション LK” で定められた Fig. 8 のような搭乗者のための空間を確保しなくてはならない．

またそれとは別に 2017 年から搭乗者の安全を守る為 Occupant Cell（搭乗者セル）という考え方が導入された．これは事故時に一定の力がかかっても変形したり壊れたりしない構造物で搭乗者を保護するという考え方である．搭乗者が運転姿勢で着席した状態で，セルを仮想的なゴムの膜で覆った（Fig. 9）と仮定したとき，体のすべての部分がこの凸閉包と交わってはならず，ヘルメットはこの凸閉包から 50 mm 以内にあってはならない．また Reg.2.11.5 で衝突時に搭乗者セルが実際にどのように搭乗者を保護するかの説明が義務付けられ，補足としてコン

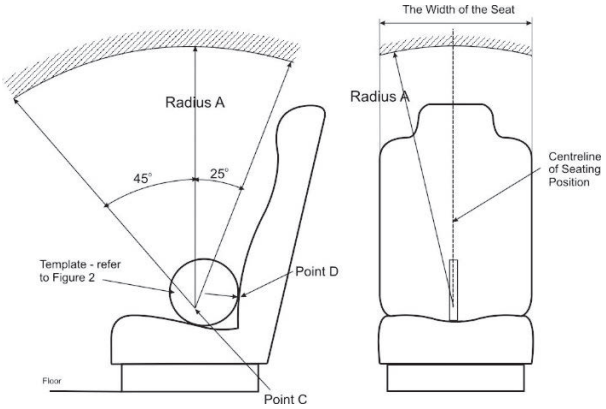

Fig. 8　搭乗者空間（Radius A = 835mm，左右 7° 以上）

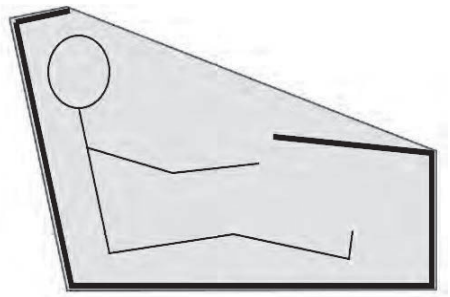

Fig. 9　搭乗者セル凸閉包の考え方

Fig. 10　西シドニー大のロールケージ

ピュータ解析を行う場合の条件が記載されているが，実際の車検では基本的にFEA（Finite Element Analysis）等の解析結果を提示することが必要だと考えたほうがいい．最終的に合格となったが，計算結果を用意していないチームは最終日まで揉めていたようである．なお補足の最後に記載されている，「50 mm厚のフォームで覆うべきである」という規定はあくまでも推奨（“should”）であり，少なくとも2017年大会では車検の対象としてなかったようで，多くのチームが対応してなかったが特に問題にはならなかった．

実際の設計では凸閉包から50 mmの規定はシートやロールバーとドライバー前方のダッシュボードやバルクヘッドを結んだラインが問題となりやすい．そのため多くのチームはロールバーではなくむしろロールケージ（Fig. 10）とも言うべきドライバーのヘルメットの周りを囲う籠型構造を用いて高さを抑えながら50 mmの規定をクリアしている．通常の垂直なロールバーを使用した場合50 mmの距離を維持するためにロールバーを高くする必要がありキャノピーが大型化し空力性能に悪影響を与えるからである．

もう一つ気をつけるのは，この50 mmというのは凸閉包からの距離であり，実際のロールケージ内側とヘルメットの隙間ではない．あくまでも強度が保証された搭乗者セルを覆う凸閉包の膜から50 mm以上ということである．搭乗者セルに関しては空力性能に直結するので安全は確保した上でなるべく余裕は持たせず規則に適合する範囲で攻めた設計が必要となるだろう．

4.2　電気系

（1）セーフステート（Reg.2.29）：WSCのソーラーカーには2015年より高電圧系安全のためセーフステートが導入されているが2017年よりセーフステート時は50 mA以上の容量のある電流ソースが外部に接続されていてはいけない仕様となった．実際にはバッテリーボックスへのコントロール用論理信号（論理素子やプルアップ等による微電流）等を除き補機用の低電圧系（12 V等）電源も遮断する必要がある．またセーフステートへの移行メカニズムは故障時に自動的にセーフステートに移行するような設計が要求され，具体的な実装ではコクピット内と外二箇所の通常閉の緊急停止スイッチを直列に接続したような構成を用いなくてはならない．（スイッチの故障時や配線の断線時は自動的にセーフステートに移行する）．さらに2019年のレギュレーションに補足として提示された例のように12 V電源をこれらのスイッチを経由してバッテリーボックス内のコンタクター（電磁開閉器）のコイル電源として使用する方式があげられている（Fig. 11：断線もしくは12 V電源を含め，いずれか1つの故障で自動的にセーフステートに移行する）．しかしこの方式の欠点は正負それぞれのコンタクターのコイルが走行時常に電力を消費することである（コンタクターが閉じた後PWMを使用して電流を減らす省エネタイプでも1個あたり1 − 1.8 W程度）．この損失を避けるためには機械式ブレーカーを使用することになるが，その場合はセーフステート移行時にFET等を使用して能動的にブレーカーのトリップコイルに電流を流しブレーカーを引き外す為，12 V

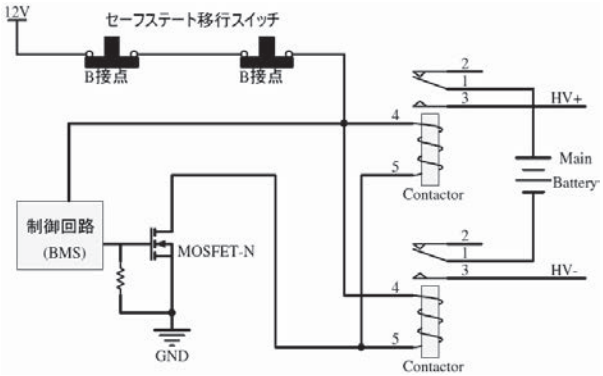

Fig. 11　セーフステート移行メカニズムの例

レギュレータが壊れたり FET 等が故障したりした場合に最悪遮断できないという結果となる．2019 年のレギュレーションでは，通常閉のスイッチと通常開の電磁コンタクターの組み合わせ以外を使用する場合は，その故障等で移行に失敗する確率が電磁コンタクターを使用したものよりも低い事を証明しなければならないと言う文言が追加されている．車検員に指摘されたときのために，MTBF の計算や DC/DC レギュレータ故障時も作動する仕組み（キャパシタやフローティング等）を取り入れることやトリップ用の回路の二重化なども検討しておいた方がいいだろう．

（2）短絡保護（Reg.2.28.10）：高電圧系の短絡保護については，ブレーカーもしくはヒューズと記載されているが，車検対策としてはヒューズを使用することを薦める．一般的なソーラーカーではバッテリーは 18650 セル 16 並列程度の物が使用されるので，内部抵抗から計算しても短絡故障電流は 1,000 A 程度であり技術的にはブレーカーで対応できそうだが，実際の車検では 3,000 A 以上程度を要求する場合があるようだ．ヒューズ自体が抵抗素子であるため余分な抵抗損失を省きたい所ではあるが，最低でもヒューズをいつでも入れられるようターミナルだけは用意しておいた方がいいだろう．

（3）二重絶縁（Reg.2.28.4）：車検でよく問題になるのがこの二重絶縁であるが，WSC では高電圧（DC 60 V 以上）かつカバー等で保護されていない導線は二重絶縁である必要がある．（具体的にはバッテリー，MPPT，モーター間など）．一番簡単な方法は絶縁体が二重になっているケーブル（Fig. 12）を使用する事であるが，製品としては主に電気溶接用途の 10 sq から 50 sq くらいの製品が容易に入手可能である．また OFC ケーブル等の二重絶縁されていない物を使用する場合は，電線保護チューブ（Fig. 13）等を装着することで二重絶縁とみなされる．

（4）バッテリーの見なし重量（Reg.2.5.4）：バッテリーの制限は化学的種別毎に重量で規定されているが，2019 年からは WSC でスタンダードとなっている 18650 型リチウムイオンセルに限り 47.6 g の見なし重量が適用され一律 420 本までという規定になった．現状では第二世代の NCR18650B や GA の重量が少し超えている程度で大きなアドバンテージは無いが，今現在 4,000 mAh をターゲットとしたアノードにシリコン系材料を使用した第三世代の製品が開発中である（2009 年には開発ははじまっていたが，シリコン電極の開発が難航しており現在まで製品化に至っていない）．これが製品化された際には容量重量共大きく増加（50 g 台後半）するが見なし重量規定により実重量の影響を受けず大幅な容量増が見込めるだろう．

5．ソーラーチャレンジの未来

近年のトップチームの高性能化によりチャレンジャークラスでは発電量が 1 kW 以下にまで削減された結果，中団以下のチームが完走を目指すだけでも CFD をある程度使いこなせる事が必須となってきている．またヨーロッパを中心にフルタイムで設計製作を行ったり，費用に関しても高価なソーラーセル，カーボン材料や大会参加費自体の値上がりで年々高騰したりし，参加する事自体のハードルが上がってしまったように感じる．一方でトップがより高い頂に到達することによってさらに遠くが見渡せ裾野が広がるのもまた事実であり，特に近年はクルーザークラスに関して明るい話題が多いように感じる．参加チームは年々順調に増え続けており，2017 年大会の優勝のアイントホーヘンが使用した外部エネルギーは 3 名を約 3,000 km 運んでわずか 45 kWh 程度である．さらに同チームから実用化を目指してスピンオフした Lightyear が 2020 年の発売に向けて実用的なソーラーカー Lightyear One（Fig. 14）を開発中とのことである．これはクルーザークラス設立の目的でもあり近年の WSC での大きな成果と言えるだろう．

Fig. 12　二重絶縁ケーブル

Fig. 13　電線保護チューブ

Fig. 14　Lightyear One（開発中）

Lightyear の WEB サイトによると Lightyear One は「太陽光から充電できる電気自動車」という位置づけであり競技用ソーラーカーには及ばないが，満充電からバッテリーの構成によって 400 km もしくは 800 km もの走行を可能としている．従来のような電気自動車にソーラーパネルを付け丸 1 日充電して数 km 分の電力を発電できるというような物とは異なり，ポルトガルで 9 日間 1,200 km のサーフトリップを楽しむというモデルルートでは道中の外部充電は一切不要である．さらにデイリーユースで年間走行距離 2 万キロ走行するケースでは，ダーウィンで使用する場合，必要な外部充電回数は年間でわずか 8 回のみである．

一方競技用クルーザークラスソーラーカーにおいても通常のナンバー登録を目指しているチームがあり，2017 年以降はレギュレーションでの言及はないが実用点に大きく加点されることは間違いないだろう．衝突安全性など解決すべき課題は多いが，実現した際には自由に路上を走行できるだけでなく市販の電気自動車とは全く異なるレベルのエネルギー効率を達成できるだろう．

WSC の開始から早 30 年が過ぎ，限定された用途においてはソーラーカーの実用化も視界に入ってきている．今後もさらなる課題を与え技術を進歩させるため，ワールドソーラーチャレンジのレギュレーションはとどまる事なく進化を続けていくだろう．

参考サイト

Bridgestone World Solar Challenge，www.worldsolarchallenge.org/
アデレードソーラーカー研究所，www.facebook.com/adelaidesolarcarlab
UNECE Vehicle Regulation 0-20，www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs0-20.html
Light year，https://lightyear.one/

著者紹介

逸見紀夫（いつみのりお）
アデレード大学 技官（電子）．2006 年に技術移民としてアデレードに移住，2007 年より現職．2015 年より同大学ソーラーカーチームに電気系アドバイザーとして関わる．専門は高速デジタル回路設計．