

ソーラカー 新型「ドリーム」の紹介

Introduction of Solar Car New "Dream"

北川 雅 史*

Masashi KITAGAWA

中 村 忠 能*

Tadayoshi NAKAMURA

春 松 正 敏**

Masatoshi HARUMATHU

桜 庭 俊 典*

Toshifumi SAKURABA

砂 田 悟*

Satoru SUNADA

要 旨

1996年10月に第四回ワールドソーラーチャレンジ(World Solar Challenge)がオーストラリアで開催された。ホンダは第三回大会に引き続いて参加し、大会新記録で二連覇を果たした。

今回、新開発したソーラカーは二人乗り車両で、主に走行抵抗、発電量、モータ効率などの性能を大幅に向上させた。また、安全面でも車両の高速化に伴い、視界の向上、四輪化などを図った。レース戦略では走行方法などを進化させ、効率の良い走行が可能となった。

ABSTRACT

The fourth World Solar Challenge (WSC) was held in Australia in October 1996. Honda challenged this race in third times, won again and established a new record.

The new solar car for 1996 WSC was developed as two seater type and greatly improved in running resistance, generated electric power, motor efficiency and others to run faster. It was also improved front view and others, and adopted four wheels to drive safely. For the racing strategy, we evolved the driving method and could drive more efficiently.

1. まえがき

ワールドソーラーチャレンジ(WSC)はオーストラリア大陸を縦断する世界最大規模のソーラカーレースとして、1987年より3年ごとに開催されてきた(Fig.1)。ホンダは1990年の第二回大会に初参加して二位となり、1993年の第三回大会では大会記録を大幅に更新し初優勝を果たした。そして1996年の第四回大会では二人乗りの新型「ドリーム」で3010kmを4日間で走破し、前回の大会記録を更新して二連覇を達成した。ここではこの新型「ドリーム」の車両技術とレース戦術について概要を解説する。

2. レース概要と主なレギュレーション

まず車両クラスに関しては、太陽電池、バッテリー、乗員数の組合わせで12クラスあり、この他にスクールクラ

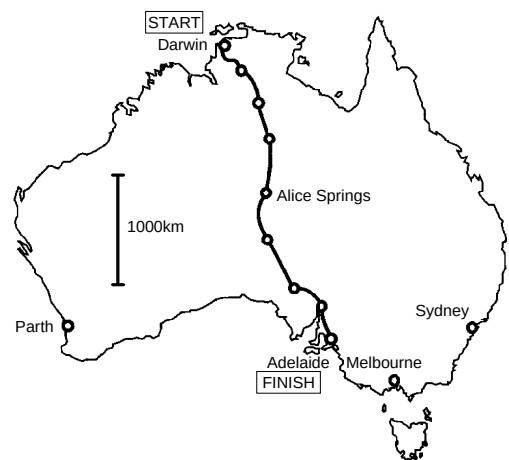


Fig.1 Race course

* 栃木研究所

* * 和光基礎技術研究センター

Table 1 Vehicle class

Solar cells	• Gallium Arsenide and new type solar cells • Silicon solar cells • Amorphous solar cells
Battery	• Silver-zinc and new type batteries • Production lead acid batteries
Crew	• One-seater • Two-seater

Table 2 Battery weight

Silver-zinc and new type batteries	40kg or less
Production lead acid batteries	125kg or less
Nickel-zinc batteries	75kg or less
Nickel-cadmium/ Nickel-Iron batteries	100kg or less

ス、プライベートクラスがある(Table 1)。

車体サイズは全長6m以内、全幅2m以内、全高1～1.6mの範囲で、太陽電池の貼付範囲は、一人乗りは投影面積で8m²以下、二人乗りは全面に貼付可能となっている。バッテリーは今回から重量制が採用され、同一容量になるように種類別に最大積載重量が決められている(Table 2)。

乗員に関しては一人当たり80kgとし、不足分はバラストで補う。ドライバーのアイポイントは70cm以上とし、一日の連続運転時間は6時間以内で、脱水症状防止のため、1L以上の飲料水の携帯が義務付けられている。

走行時の安全は、ブレーキ性能が車速30km/hから22m以内で停止できること、80km/hで走行する三両連結大型トレーラとのすれ違いで安定していることとなっている。

予選は、すれ違い走行テスト時の最高速度を計測し、スタート順位が決められる。

レースの一日の走行時間は8:00～17:00で、停止した地点でキャンプをしながら行われる。走行時間以外にも日の出ている朝夕は太陽電池を使った充電が許されている。3010kmのコースには報道と車両チェックを兼ねたメディアストップという30分間(前回は10分間)の停止を義務付けた地点が7ヵ所あり、通常この時間を使ってドライバ交代、タイヤ交換、太陽電池を使った充電、サポート車両の給油などがおこなわれる。

3. 開発コンセプトと目標性能

過去のWSCにおけるレース順位は車両の平均発電量と走行抵抗のバランスで決まる車速の順序となっている場合が多い。つまり車両の性能でレース結果がほぼ決まってしまうため、確実に優勝するには、

- (1) 有力チームの進化を予測し、目標性能をできるだけ高く設定する。
- (2) 定めた個々の目標値を守り切り、目標性能通りの車両を製作する。
- (3) エネルギーロスを少なくし、天候の変化に応じて車両の性能を100%発揮できるレース戦略・体制を作る。

の三要素を妥協することなく行うことが重要である。

過去の大会の上位入賞車は全て一人乗りクラスであり、その走行抵抗と太陽電池の発電量は回を重ねるごとに進歩している¹⁾²⁾。中でも1993年度の「ドリーム」(93モデル)は当時世界最高水準の技術で製作されたトップレベルのソーラカーであり、今回(96モデル)はこの93モデルに3年間の技術進化を加えた一人乗り車両を仮想競合車に設定した。そしてこの仮想競合車を確実に上回れると同時に、過去最悪であった第2回大会の天候(晴天率59%)でも93モデルの大会記録84.96km/hを更新できることを今回の目標に定めた。しかし同じ一人乗りクラスでは、93モデルの走行抵抗を低減し、太陽電池の性能を向上させても、Fig.2に示すように85km/h以上の性能向上は望めないことが性能シミュレーションで分かった。そこで今回は重量増加による走行抵抗の悪化はあるが、太陽電池の貼付面積を増やすことが可能な二人乗りクラスに注目し検討した。その結果、Fig.3の網掛け領域に示すように仮想競合車を上回れ、かつ1993年の記録を更新できる車両の構築が可能であることが分かり、二人乗りクラスでの開発を決定した。

また、今回は常時100km/h以上での巡航を想定し、従来の三輪仕様から四輪仕様で開発を行い、運転視界や高速走行時の安定性、制動性能等の安全面も向上させることを決定した。

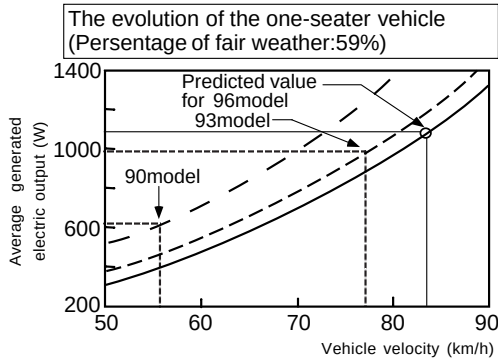


Fig.2 Balanced speed of one seater

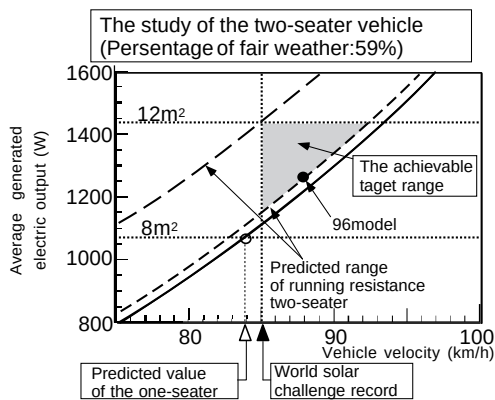


Fig.3 Balanced speed of two seater

4. 走行抵抗の低減

4. 1. 空気抵抗の低減と車体形状

ソーラカーの性能を向上させるには、走行抵抗を小さくし、発電量を多くすることが重要である。100km/hで走行するソーラカーの走行抵抗の約80%は空気抵抗であり、空気抵抗係数 C_D と前面投影面積 A をできるだけ小さくすることが必要である。また同時に、二人乗り車両では太陽電池の貼付面積をできるだけ大きくできる車体形状が必要である。従って、空気抵抗の低減と貼付面積の増加を高次元で両立できる車体形状を造ることが最も重要である。

まず最初は数タイプの1/6スケールモデルを作製し模型風洞で基本形状を検討した³⁾⁴⁾。そして最も $C_D \times A$ 値の低いものを採用し、その基本形状に対しFig.4の①～⑥の細部形状の検討を行なった。特に①については後部の絞り込み量による $C_D \times A$ の増減量と貼付面積の増減量を比較し、最も走行性能が高くなる最適形状を求めた。また⑤

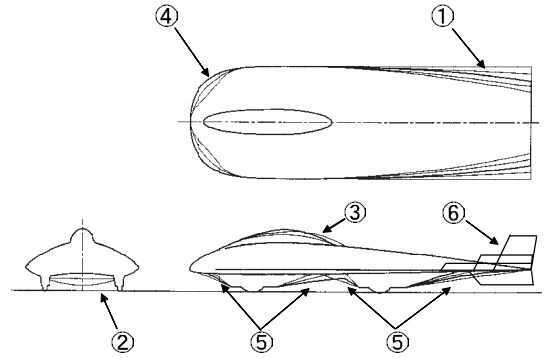


Fig.4 Detail study of 96model shape

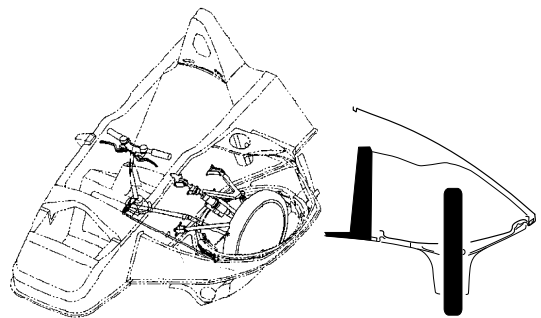


Fig.5 Tire cover

に関しては最も空気抵抗の少ない形状の大型ホイールカバーを装着した。前輪部のカバーにはステアリングと連動した回転機構を用い、タイヤの下面開口部を最小限とした(Fig.5)。③に関してはドライバとコ・ドライバを背中合わせに着座させ、最小の容積になるようにし、最も空気抵抗の少ない形状とした。これらの検討により最終的には実車において $C_D \times A$ 値0.101(A は0.999 m^2)と貼付面積9.73 m^2 を得た。

4. 2. 軽量化と車体強度

走行抵抗を低減させるには軽量化も重要である。車体重量の約1/3を占めるボディはこの軽量化と高強度化を両立させることが重要である。ボディはCFRP材を主体としてアッパカウルとシャシをそれぞれ一体化した構造とした(Fig.6)。軽量化に関しては93モデルでの使用素材の重量分析を行ない、軽量化効果の大きい素材を選定した(Table 3)。

ボディ重量の70%を占めるCFRP材は、従来のクロス材より高弾性・高強度の繊維が使用できる一方向性材(UD材)を採用した。UD材は繊維密度が高く、積層した場合に

Table 3 Weight of body materials

Material	Weight(kg)	Weight proportion(%)
CFRP	37.8	70
Honeycomb	5	9
Paint	4	8
Glue	3.5	7
Acrylic	2.03	4
Foam	0.5	1
Insert nut	0.48	1

余分な樹脂が少なくでき、かつ板厚を薄くすることができた(Fig.7)。また、アラミドハニカムは、従来より含浸樹脂成分の少ないものを採用し、かつ、板厚をあげることで、軽量化と高剛性化を両立させた。

塗装、接着では上下二分割のアップカウルを一体成形することで、接着剤や形状補修材の使用量を大幅に少なくした(Fig.8)。

これらの結果ボディは20%(約10kg)軽量化でき43kgを達成できた。また、サスペンションアーム、ステアリン

グ、ホイール等のシャシ部品やユニットケース、バッテリーボックスもCFRP化を図り軽量化と高強度化の両立を図った(Fig.9)。車体重量(バッテリー除く)は合計125.6kgを達成した。

3010kmのコース上にはグリッドと呼ばれる、家畜の逃走防止のために道路上に10cm前後の間隔でレール状の鉄格子を敷いた溝があり、レールと路面との段差が数十mmある。コース上に111箇所あるこのグリッドを減速せずに通過し、3010kmを破損することなく走破するには強度・耐久性も併せて重要である。

高強度化についてはレースの一年前に実際に現地コース調査を行ない、路面との段差を計測した(Fig.10)。そしてグリッド通過の強度耐久要件を定め、テストコースにおいてグリッド通過テストを行ない、サスペンション

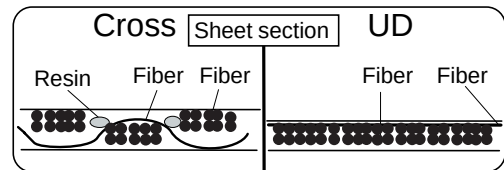


Fig.7 Comparison of carbon sheets

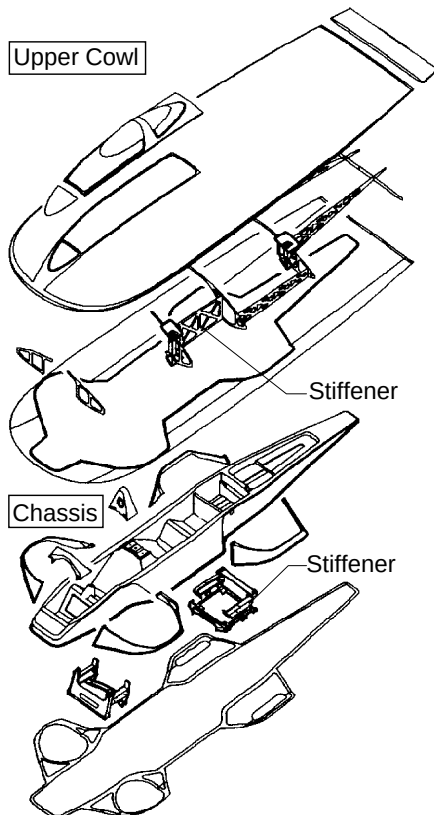


Fig.6 Body structure

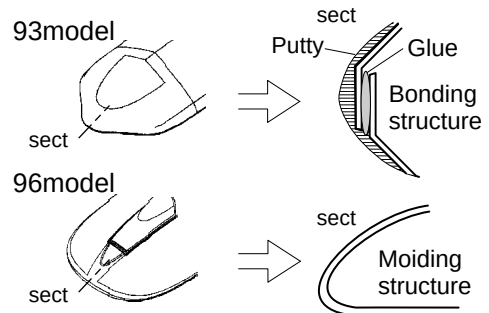


Fig.8 Section of body structure

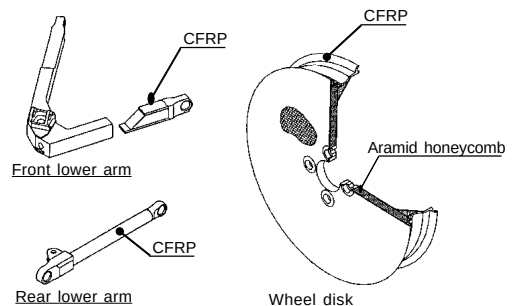


Fig.9 Other CFRP components

トローク、パンプラバーのセッティングと同時にサスペンションアームの強度検討を行なった。またボディにおいてもサスペンション取付け部など入力荷重が高いところは積層数を上げるとともに、スティフナを装着し補強を行なった(Fig.6)。これらの結果、グリッド平均通過車速を前回のレースより12km/h向上させることができた。

4. 3. 転がり抵抗の低減

二人乗り車両では、車両総重量が増加するため、転がり抵抗を低減することも重要である。今回は3社のソーラー専用タイヤのRRC(Rolling Resistance Coefficient)を同一荷重で測定し、最も優れていたミシュラン社製を採用した(Fig.11)。実車計測転がり抵抗係数 μ_r では0.00229を達成した。また、今回のタイヤ構造はラジアルチューブレス(65/80-16)であり、耐パンク性も併せて向上させることができた。

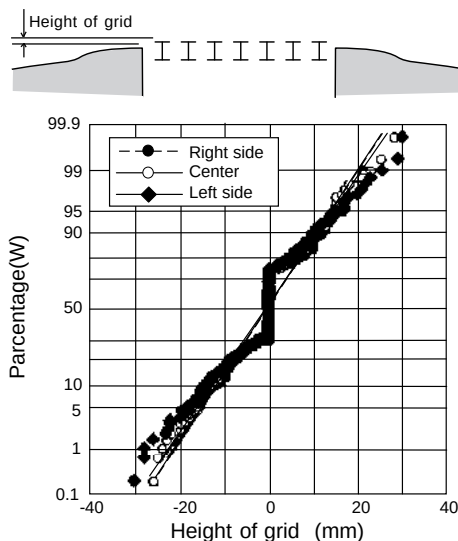


Fig.10 Height of grid

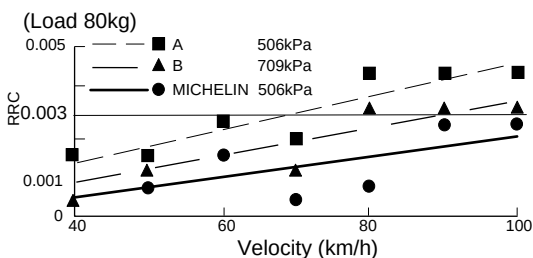


Fig.11 RRC of tires

5. 高効率ホイールインモータと薄型化

5. 1. 駆動方式の検討

駆動方式は、二輪駆動と一輪駆動の選定検討を中心に各種方式の比較を行い、最も小型、軽量にできる「後輪一輪のダイレクト駆動」方式を採用した。この方式は効率、信頼性の点でも優れている。ただ、96モデルは四輪車であるため、片輪駆動によるヨーモーメントで発生するエネルギーロスと操安性への影響が懸念点であった。しかし理論上のヨーモーメント自体はごく小さく、平坦コース巡航時の修正舵による損失は1.3W程度であり、無視できるレベルであることがわかった。さらに駆動輪を左側とすることで、右向きモーメントを路面キャンパによる左向きモーメントとバランスさせることができた。

5. 2. モータ出力の検討

モータの巡航時の出力は走行抵抗とのエネルギーバランスから1.5～2 kWと決定され、90～100km/h付近で最大効率が得られるよう設計した。最大トルクはコースの最大勾配の登坂条件から58Nm以上と設定され、最大出力は、90～100km/hで走行しているロードトレイン(全長50 m)や先行チーム(150m)を1分以内で追い越せることを要件とし、6 kWと設定した(Table 4)。

5. 3. 薄型化と高効率化

モータの高効率化には原則的に厚みがあるほうが有利であるが、薄くできればタイヤまわりの空気抵抗を低減できる。空気抵抗による損失は速度の三乗に比例するが、モータの電磁部の損失自体は一次～二次比例する。寄与度計算などで薄型化による走行抵抗低減効果の方が大きいことが分かり、薄型化を優先し高効率化との両立を狙った。モータの電磁部レイアウトでは損失低減のために厚さ25 μ mのアモルファス積層鋼板を採用し、コイル材も平角線を用いて占積率を上げるなどの工夫を行い、超薄型の高効率ホイールインモータを実現できた(Fig.12)。

Table 4 Motor specifications

Maximum output	6kW	Efficiency	Over 95%
Maximum torque	80Nm	Weight	9.3kg
Maximum rotating speed	1500rpm	Size	$\phi 319 \times 58$ mm

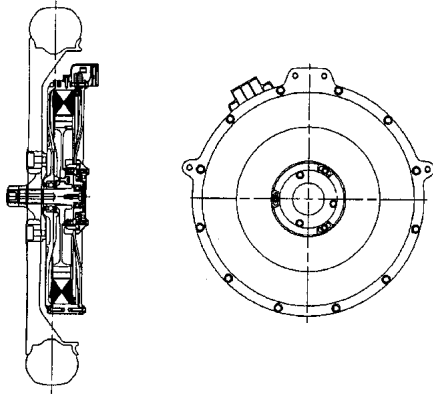


Fig.12 Section of motor

5. 4. 4 ステージ制御PDU

PDU(Power Drive Unit)のスイッチング素子には損失の少ないMOS-FETを採用、さらに放熱特性に優れた冷却フィンの採用で冷却ファンを不要にし、エネルギーの消費をおさえた。

レースでは天候条件や風の影響などで目標巡航速度どおりに走れないこともある。その場合必然的にモータの最高効率点から外れた領域を使うことになり、エネルギーのロス招く。そこで①～④の4つの制御方式を速度やトルクに応じて組み合わせることにより、効率95%を超える領域を従来方式より6倍近く広くすることができた(Fig.13)。これにより85～118km/hという広い範囲において効率95%以上の高効率の走行が可能となった(Fig.14)。

- ① Trapezoidal current control
- ② Sinusoidal current control
- ③ Trapezoidal (120deg) voltage control
- ④ Trapezoidal (180deg) voltage control

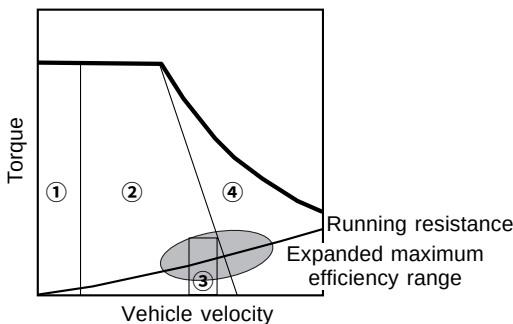


Fig.13 Control methods of motor

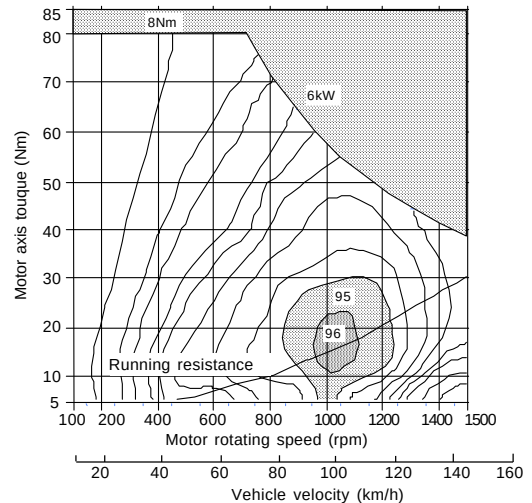


Fig.14 Total efficiency (Motor+PDU)

5. 5. 予選用モータ

過去の大会の予選では130km/hが最高記録であった。今回は140km/h以上を目標最高速度と定めた。加速区間は650m程度であるため予選専用の高出力、高トルクモータが必要になった。レース仕様の駆動系や足回りと部品の共通化を図り、モータ電磁部の専用化で対応した。バッテリーの性能限界まで引き出せるように最大出力19kW、最大トルク190Nmという設定とした。予選前の練習走行では153km/h(実測値)を記録し、期待通りの性能を得た。

6. 電装負荷の軽減とコンパクト化

背中合わせの二人乗り車両では、電装部品の搭載スペースが限定されるため、コンパクトな設計が要求される。

今回はモータPDU、制御用ECU、バッテリーキャナ(BSU)、ブレーカ、ダウンバータを一つの統合ユニット(ICU)にまとめバッテリーボックスの上部に、更にその後部には太陽電池の最大電力を取り出すピークパワートラカ(PPT)を配置した(Fig.15)。ICUとバッテリーボックスは各々の下面と上面に埋め込まれたコネクタでダイレクトに接続できるようにし、作業性を向上させた。各制御装置はシリアル通信で接続しハーネス、コネクタの削減を図った。

メータは表示内容に優先順位をつけ、3モード切替式とし視認性の向上と小型化を図り、ドライバ、コ・ドライバ席の両方に配置した(Fig.15)。

アップカウルではフラットケーブルを用いて軽量化、省スペース化を図った。また灯体類も高輝度LEDを採用し、省電力化を図った(Fig.15)。

全体システムをFig.16に示す。

7. 発電量の向上

二人乗り車両で目標達成可能領域(Fig.3)を実現するためには、発電量の向上が必要である。少しでも多く発電させるには、太陽電池の単体効率と貼付面積の向上だけでなく、発電量が最大となるような貼付方法の検討が重要である。具体的には、三次元曲面の太陽光入射角度違いによる発電量低下を最小にするソーラパネルの分割方法と分割された各チャンネルでの発電量を最大にする太陽電池の並べ方の検討を行った。これらの検討により約20%の発電量の向上を得た。

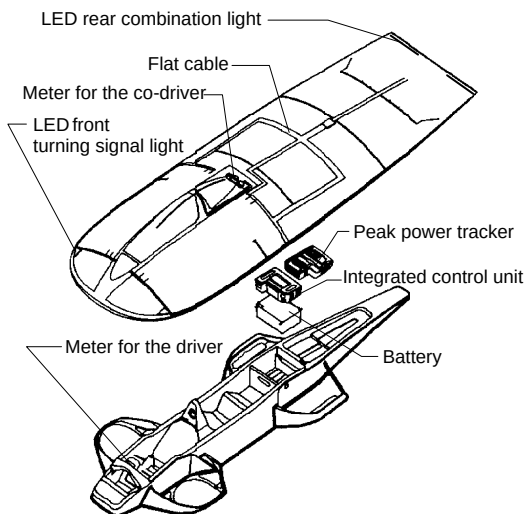


Fig.15 Electric component layout

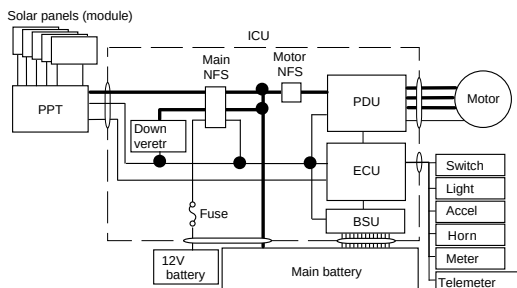


Fig.16 Total system block diagram

7. 1. 太陽電池

今回採用した太陽電池はPAEL(Passivated Emitter, Rear Locally diffused)セルと呼ばれる構造を持つNSW(New South Wales)大学製の単結晶シリコンタイプで、単体の変換効率は23%以上である。合計4500枚の太陽電池は導電エポキシ接着材を用いて表面電極と裏面電極が一枚一枚瓦重ね状(Shingling)に接続され貼付効率の向上が図られている。太陽電池は取り扱い性の向上とチップングからの保護のため、104枚(13×8)単位を基本にパネル状に成形(モジュール)されている。

パネルは、反射防止膜をコーティングしたポリカーボネートの表面材と透過率の高いシリコン樹脂の緩衝材および裏面反射材でラミネートされている。また、万一の損傷を考え4枚ごとにバイパスダイオードがパネル裏に装着されている。

各チャンネルはモータ電圧(108V)を基準に太陽電池電圧の温度特性とバッテリー最低電圧を考慮し、150~170枚の直列接続を2つ並列接続した構成が基本となっている。

7. 2. 発電シミュレーションと最適貼付方法

7. 2. 1. ソーラパネルチャンネル構成

ソーラパネルを貼る場所は三次元曲面となり、太陽電池ごとに太陽光入射角度の違いによる発電量のばらつきが生じる。パネル内で直列に接続された太陽電池の中で発電量のばらつきが生じると、その中で最も電流の低いものに全体が制限される。そのため、太陽電池を貼る面の法線ベクトルの近いものをグループ化し、一つのチャンネルとして分割することで損失を低減することが必要である。

96モデルの法線ベクトルを解析するために、三次元データ自動計測装置を使用し、1/6モデルの法線ベクトルを計測し、その分布を求めた(Fig.17)。車両後方は分布の密度が高く、法線ベクトルのばらつきが小さい。逆に車両前方は高度角のばらつきが大きく、前後方向に細長くチャンネルを構成した方が損失は小さくなる。従って、搭乗者の視界を確保するためのキャノピ横のチャンネルを細長くレイアウトし、キャノピを中心に左右に伸びる影の影響を最小にするようにした。

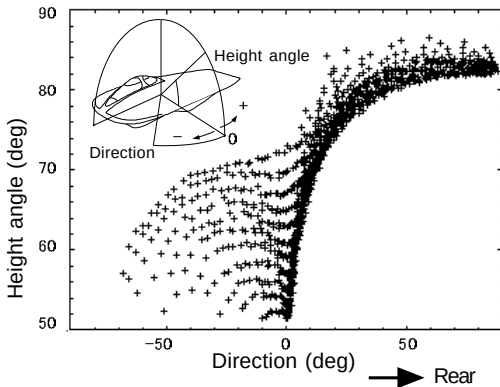


Fig.17 Distribution of vector

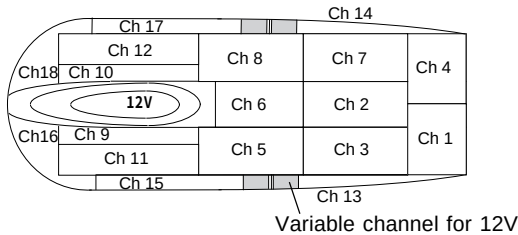


Fig.18 Channel layout of solar panel

チャンネル構成の条件としては、

- (1) 電圧はモータの使用電圧以下にする
- (2) キャノピの影の影響を最小にする
- (3) PPTの消費電力と効率をバランスさせる

上記の3点を考慮し、最大数を18チャンネルにした。

以上の条件と発電量シミュレーションにより、チャンネル構成を決定した(Fig.18)。この発電シミュレーションは、太陽電池の法線ベクトルと太陽光の入射角度から、ソーラパネルの透過率と発電効率により発電量を求め、太陽軌道の変化に応じて発電量予測ができる。

7.2.2. チャンネル内の太陽電池レイアウト

今回の太陽電池の単体効率は23%~24%の範囲で分布している(Fig.19)。直列に接続された太陽電池は、同一チャンネル内で発電電流の不揃いが少ない程良い。そのため、太陽電池は開放電流特性の高い順に並べ、Fig.18に示すようなチャンネルにグループ化した。各チャンネルごとの太陽電池の並べ方は、走行中の発電量を予測し、最大発電量となる並べ方を求めた。例えばあるチャンネルで直列に接続された太陽電池の効率がすべて同じ場合、法線ベクトルの異なる太陽電池の各発電電流から直

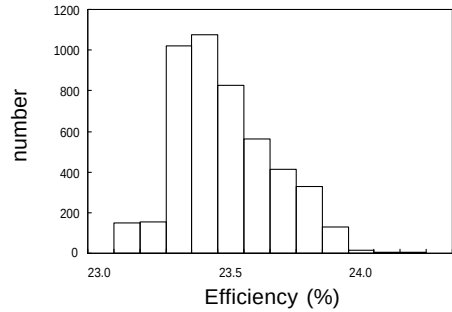


Fig.19 Distribution of solar cell efficiency

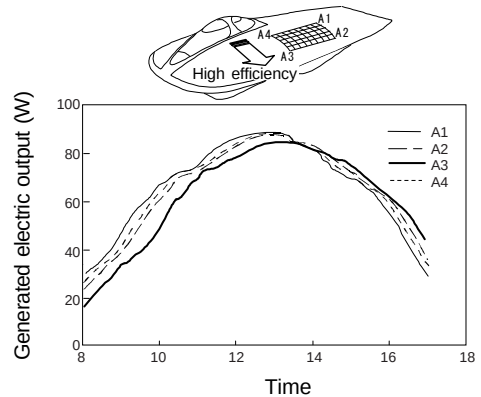


Fig.20 Difference of generated power

列に接続された太陽電池全体の発電量を求めるとFig.20のようになる。よって、発電量の低いA3に効率の良い太陽電池を配置した方が、全体の発電量が増える。つまり、一日の太陽軌道変化の中で、同じチャンネル内で発電量の低い部分から順に、効率の高い太陽電池を配置する方が全体の発電量を増加させることになる。

7.2.3. 制御装置用電源(12V)の最適化

制御装置は、天候にかかわらずほぼ一定の電力を消費する。12V発電用の太陽電池で不足する分は、駆動系バッテリーよりダウンコンバータで12Vに降圧して使用する。しかし、ダウンコンバータの効率が86%程度であり、エネルギーを無駄にしないためには、ダウンコンバータの稼働を最小限に抑えるよう12V発電用の太陽電池数に最適化が必要である。

ダウンコンバータ損失を12V発電用太陽電池数に応じて予測するとFig.21のようになる。これから求められた最適な太陽電池数は主にキャノピ部で確保し、不足分はアッパカウル部のパネルから補った。

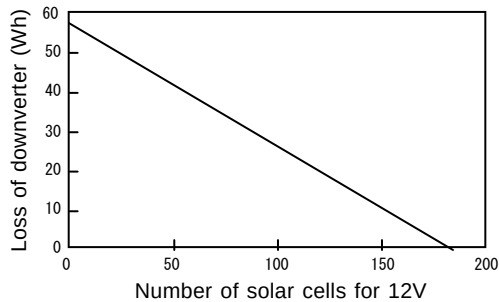


Fig.21 Loss of downverter in race time

7. 2. 4. 可変チャンネル式ソーラパネル

Fig.22は、7. 2. 3で求めた12V発電用の太陽電池数で一日の発電量を予測した結果である。8:00~17:00は走行中、それ以外の時間はアップカウルを太陽に垂直に向けた充電中の発電量を表している。レース中は、日射量の少ない朝夕や曇りの場合など発電の状況が変化する。発電量が低い場合には常時ダウンバータが働き、損失が多くなる。そこで、今回は、可変チャンネル式のソーラパネルを採用した。これは、駆動用のソーラパネル内で、12V用の直列のパネルを分割し、駆動用か12V用かを選択できるようにしたもので、Fig.18のCh13、14、15、17内に合計4チャンネル用意し、12V用の太陽電池を状況に応じて増やせるようにした。チャンネル内の可変式パネルの回路図をFig.23に示す。

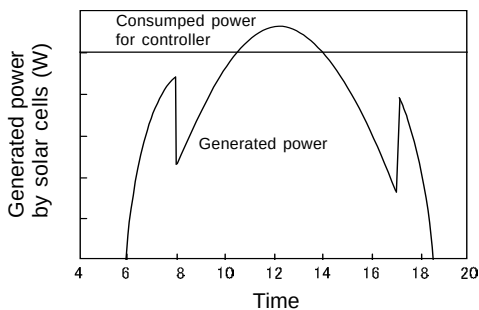


Fig.22 Generated power for 12V

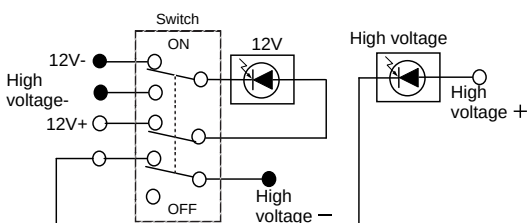


Fig.23 Generated power for 12V

7. 3. ピークパワートラッカ (PPT)

太陽電池の発電特性は動作電圧に応じて異なり、効率の良い発電を行うためには最大発電量となる電圧(V_{pmax})を保持する必要がある(Fig.24)。この電圧は太陽電池の温度、日射量により変動し、また接続先のバッテリー電圧も負荷変動などで変動するため最大出力点電圧からずれてしまう。この電圧変化に対応するため、太陽電池とバッテリーの間にPPTを搭載し、常に太陽電池の発電が最大になるようにした(Fig.25)。

PPTはチャンネル数が多いほど発電量が増え、回路損失も減るが、逆に消費電力と重量が増え、また昇圧電位差も大きくなる。そこで今回は車体形状なども考慮し、18チャンネルの構成とした(Fig.18)。

また、各チャンネルの発電量が低い時は変換効率が低下するため、入力電圧が同じ二つのチャンネルを並列接続に切替え、一方の昇圧回路で駆動を行う。これによりチャンネル数を最小の10チャンネルまで減少させることができ、高効率領域の広域化と省電力化を行った(Fig.26)。

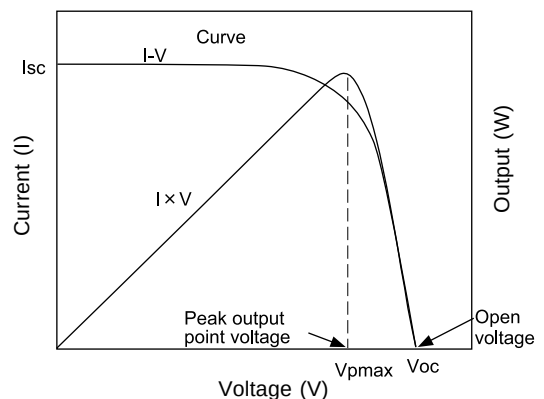


Fig.24 I-V Characteristics of solar cell

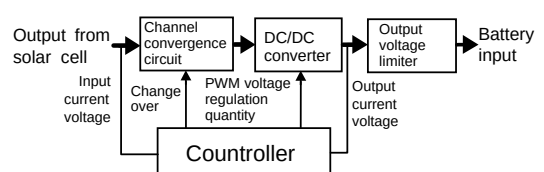


Fig.25 Block Diagram of PPT

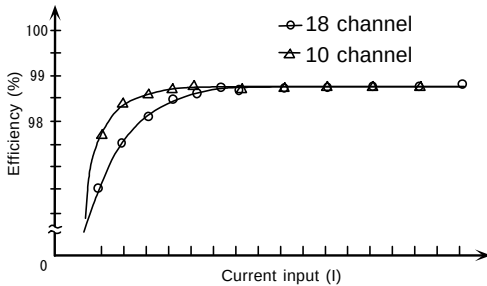


Fig.26 Efficiency of PPT

電圧の調整には非絶縁型昇圧タイプのPWMコンバータを採用し、バッテリーとPDU回路の保護のため出力電圧リミッタを設定した。最大電力点追跡は、各パネルの発電電流、電圧から発電電力を算出し、電力が最大となるようPWMフィードバック制御を行っており、50V/s以上の追尾速度と99%以上の追尾性能が得られた(Fig.25)。

また、PWMスイッチングロスとPPT消費電力低減のため、各チャンネルの発電量、昇圧電位差に応じて個別にPWM周波数の最適化を行っている(Fig.26)。

8. バッテリー容量の向上

雨天・曇天の走行を可能にし、走行時間以外にも太陽光から充電を行なうためにはバッテリーの搭載が必要である。今回もエネルギー密度、出力密度に優れたユアサ製酸化銀亜鉛電池を採用した。電池は4セル一体型で18モジュール(108V)で構成されている。今回は重量制で上限が40kgに規制されている。容量に寄与しない電槽ケースや電極を4セル一体型化により軽量化し、その分活物質量を増量し公称3.24kWhが得られた(Fig.27)。12V系バッテリーもリチウム電池を採用し、同様に容量の増大を図った。

9. 安全対策

車両の高速化に伴い、今回は安全面も性能向上を図った。

9. 1. 視界と操作性の向上

まず前席の視界に関しては独立型キャノピの採用により前側方視界が大幅に向上し、後方視界は小型室内ミラーで行なった。また、後席からも後側方視界が得られるため、追越し時の安全性が向上できた(Fig.28)。

操作系に関してはスイッチ類の数を減らし、ステアリングに集中配置することにより走行中にステアリングから手を離さずにすべての操作を可能とした(Fig.28)。

9. 2. 操縦安定性の向上

直進安定性に関しては四輪ダブルウィッシュボーン方式を採用し、ジオメトリの適正化を行なった。これにより高速走行時のヨーレート頻度が大幅に少なくなり、タイヤパンク時も安定した姿勢での停止が可能となった。

実際のレースでは2~8m/sの自然風が斜め前方から吹くことが多く、横風安定性の確保も重要である。96モデルは独立型のキャノピのため、フロント部への横風の影

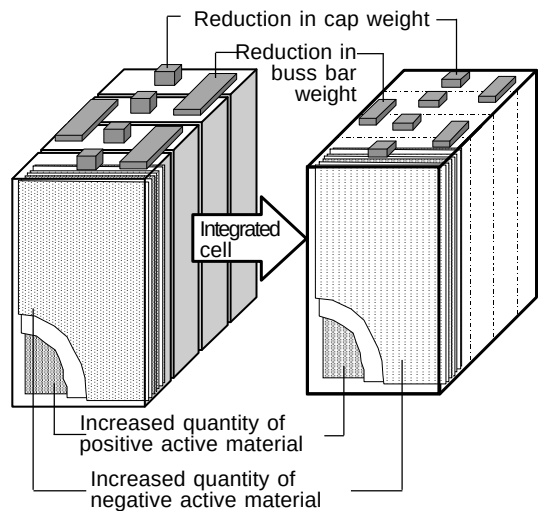


Fig.27 Battery construction

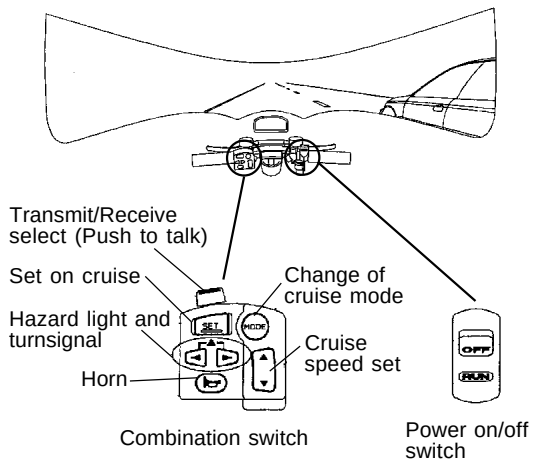


Fig.28 Front view and steering switch layout

響が大きい。従ってバラストを先端部に配置し、フロントよりに重量を配分することで許容範囲と判断できる横風安定性を確保した。

ブレーキは四輪に装着し、フロントが油圧式ユニサーボドラム、リアがホイールインモータと両立できる油圧式リムタイプとした。その結果、レース走行に十分な制動性能が得られた(Fig.29)。

9.3. 軽衝突とロールオーバー対策

レースでは市街地走行時の軽衝突や荒れた路肩でのロールオーバーの可能性も考えられるため、衝突安全も考慮する必要がある。正面の軽衝突に関しては、ドライブの下肢を保護するためシャシ先端部にCFRP補強部材を追加した約330mmのクラッシュアブルゾーンを設けた(Fig.30)。ロールオーバーに関してはドライブとコ・ドライブを四点式シートベルトでシャシに固定し、軽量ヘルメットとロールバーで頭部保護を行なった(Fig.30)。また、万一の火災発生時の緊急脱出を可能にするため、独立キャノピは車内から取り外せる設計にした。

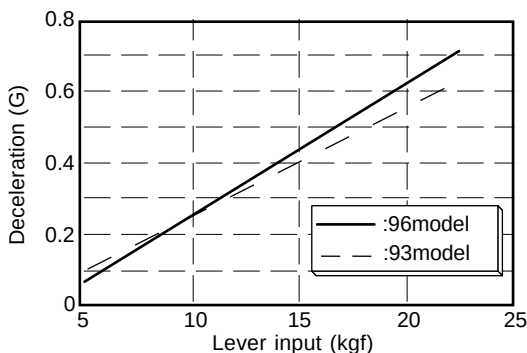


Fig.29 Brake performance

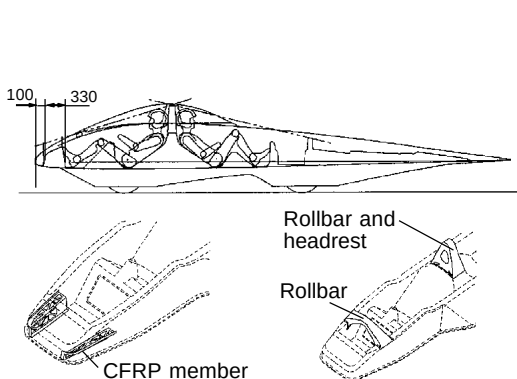


Fig.30 Crash safety

また感電対策のため、高圧系システムと12V系システムは互いに絶縁され、かつ車体からフローティングされている。

10. レース戦略

10.1. レース編隊

今回はレース車両の前方に天候車、先行車、先導車、後方に指令車、トラック、後方支援車の6台のサポート車両を用意しレース編隊を組織した(Fig.31)。レース中の相互連絡はCB無線および衛星電話で行ない、互いの位置はGPS(Global Positioning System)を用いて確認した。またF-1で使用していたテレメタリシステムでデータ送信を行ないレース戦略を立てた。

天候車では3時間おきに75cm径パラボラアンテナで気象衛星ひまわりの静止衛星画像(Fig.32)を、また衛星電話を使ったインターネットによりオーストラリア気象庁の各種天候情報を入手した。そして専用の天候図(Fig.33)を作成し、数時間後からゴール予定日までの天候を予測し、指令車にデータ通信した。

先行車は主に路上の動物の死骸やバーストしたタイヤなどの飛散物の除去を行ない、レース車両の安全な走行をサポートした。また先導車は直前の道路状況を連絡し、一般車両追い越し時などのサポートやメディアストップでの作業準備を行なった。トラックにはスベア車両、スベア部品、食料、キャンプ用品などが搭載され、後方支援車が2位以降のチームの監視を行なった。

各車の情報はすべて指令車に送られ、指令車内でレース車両のシステム状況や天候、発電量、残容量の監視・予測を行ない逐次ペース配分を計算し指示した。

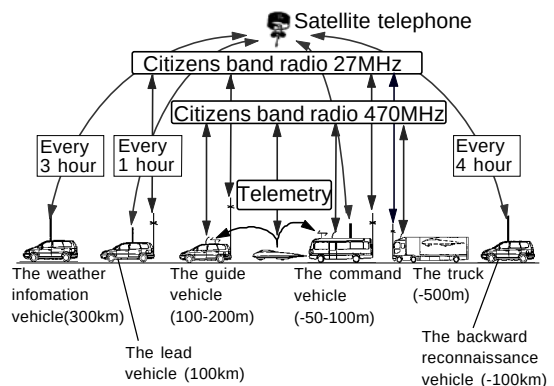


Fig.31 The makeup of race caravan

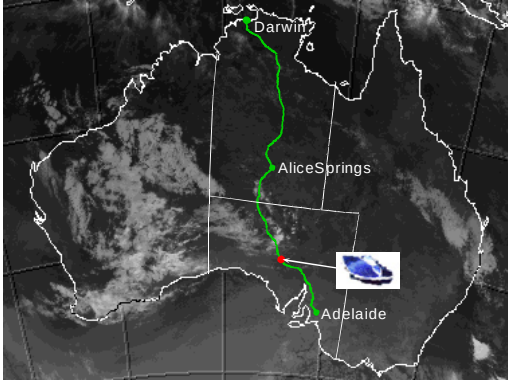


Fig.32 Weather data obtained directly from the weather satellite of Himawari

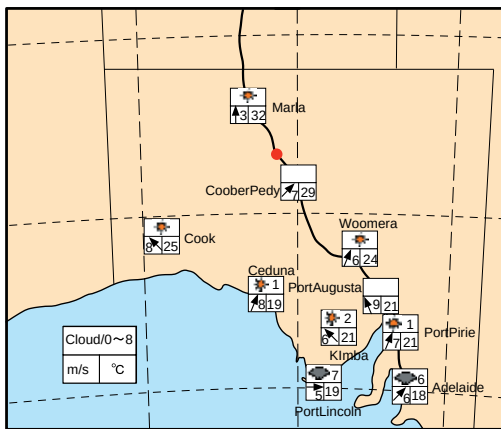


Fig.33 Original weather map

10. 2. 走行戦略

10. 2. 1. 走行戦略と天候予測

走行戦略の目的は、エネルギーを最大限に獲得し、エネルギーを無駄にしない効率の良い走り方と走行スケジュールを確立し、最も早くゴールすることである。

ある区間(走行距離 S)を走行した時の消費エネルギー E の計算式を以下に示す。

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot S \cdot V^2 \quad (\text{空気抵抗損失})$$

$$+ \mu_r \cdot Wt \cdot g \cdot S \cdot \cos \theta \quad (\text{転がり抵抗損失})$$

$$+ Wt \cdot g \cdot S \cdot \sin \theta \quad (\text{勾配抵抗損失})$$

ρ : 空気密度 V : 対気速度 [m/s]
 C_D : 空気抵抗係数 A : 前面投影面積 [m²]
 μ_r : 転がり抵抗係数 Wt : 車両総質量 [kg]
 g : 重力加速度 [m/s²] S : 走行距離 [m]
 θ : 路面勾配 [rad]

上式より、走行距離 S が一定の場合、走り方(対気速度)によらず転がり抵抗損失と勾配抵抗損失は一定である。つまり、ある区間(走行距離 S)を同一時間で走行する場合、空気抵抗損失を最小にする走り方が、最も効率の良い走り方となる。ここで、任意の区間(走行距離 S_1 、 S_2)をそれぞれ対気速度 V_1 、 V_2 で巡航走行する場合(走行時間と走行距離は一定)の空気抵抗による消費エネルギーと V_1 、 V_2 の関係を求めた。

ここで、走行時間は一定なので

$$S_1/V_1 + S_2/V_2 = T \quad (\text{走行時間一定})$$

$$S_1, S_2 \text{ [m]}, \quad V_1, V_2 \text{ [m/s]}$$

また、走行距離も一定なので

$$S_1 + S_2 = S \quad (\text{走行距離一定})$$

となる。上式を整理すると、

$$V_2 = V_1 \cdot (S - S_1) / (V_1 \cdot T - S_1)$$

となり、 V_1 が決まれば V_2 も一意に決定される。

そこで、

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot S_1 \cdot V_1^2$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot S_2 \cdot V_2^2$$

において V_1 を変化した時の消費エネルギー $E_1 + E_2$ と V_1/V_2 の関係を求めた(Fig.34)。その結果、 $V_1 = V_2$ の対気速度一定で走行した場合が最も効率の良い走り方となることがわかった。そこで、スタートからフィニッシュまでの目標平均車速を求め、レース全体の走行スケジュールを決定した。

この目標平均車速は、フィニッシュまでの発電量と消費エネルギーのバランスから決定される(Fig.35)。発電量を予測するためには、フィニッシュまでの天候予測が必

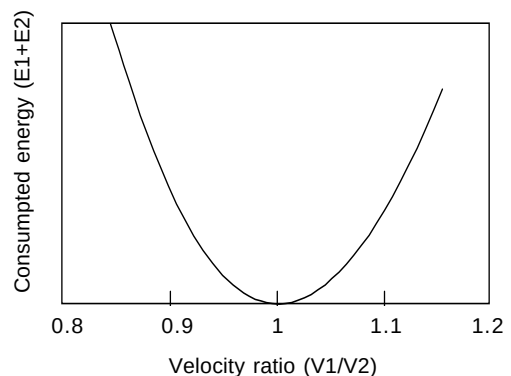


Fig.34 Relationship between verocity ratio and consumed energy

要であり、消費エネルギーの予測においても風の予測が必要である。しかし、天候、風を精度よく予測するのは非常に難しい。そこで、以下の方法を考案した。

天候、風は、予測する時間が離れているほどその精度が悪くなる。そこで、毎日の走行終了後、目標平均車速を計算し直し、走行スケジュールの見直しを行った。その結果、レースが進むにつれて天候予測の精度が向上し、スタートからフィニッシュまで目標車速の変化が少ない走行ができた。Fig.36に走行スケジュール決定アルゴリズムを示す。

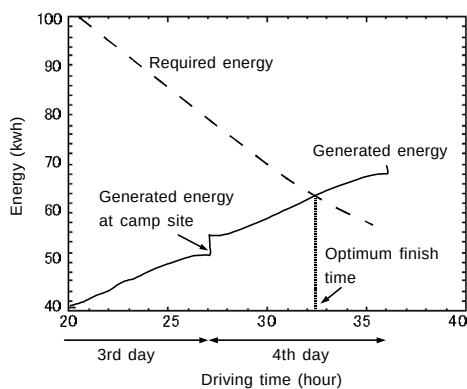


Fig.35 Calculation of the optimum finish time

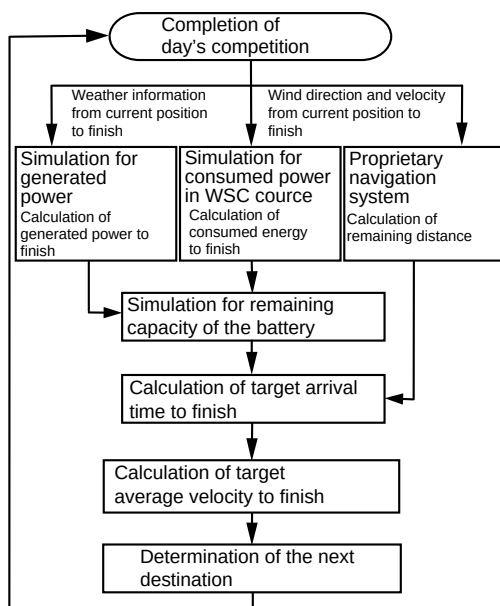


Fig.36 Target average velocity determination algorithm

10. 2. 2. クルーズコントロールシステム

対気速度を一定に保つためには、風の変化に応じて車速が変化する必要がある。そこで、風の変化に応じて車速が変化するクルーズコントロールシステムを開発した⁵⁾。登り坂、向い風の高負荷側と、下り坂、追い風の低負荷側で設定車速に応じてエネルギー効率の高い制御目標ラインに持ち替える状況適応型のクルーズコントロールを行った (Fig.37)。制御目標ラインとなるモータ入力Pの計算式を以下に示す。

(高負荷側)

$$P = \text{基準電力} \cdot (\alpha \cdot (\text{設定車速} / \text{実車速})^3 - (\alpha - 1))$$

(低負荷側)

$$P = \text{基準電力} \cdot (\beta \cdot (\text{設定車速} / \text{実車速})^3 - (\beta - 1))$$

$$\text{基準電力} = 1 / 2 \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot \text{設定車速}^2 + \mu_r \cdot W_t \cdot g$$

α, β : 設定車速により一意に決定

ここで基準電力とは路面勾配ゼロ、無風状態の走行抵抗であり、 α, β は各車速ごとの走行シミュレーションにより、最適な数値を決定した。また、走行シミュレーションは走行距離に合せた路面勾配データを持っており、精度の高い消費電力シミュレーションが可能となっている。

10. 2. 3. ナビゲーションシステム

レース中の走行位置、目標地点、停車を義務づけられたポイント(メディアストップ)、グリッドを正確に把握するために、現地コース調査を行い、専用のナビゲーションシステムを開発した (Fig.38)。システムは、地図情報を持つコンピュータとGPSレシーバで構成されている。

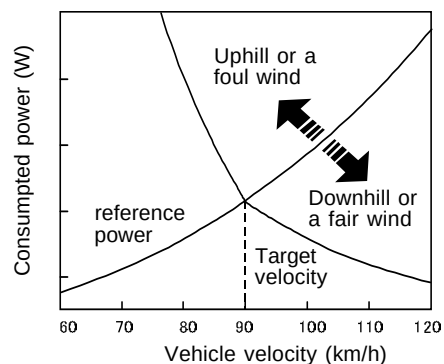


Fig.37 Adaptive cruise control system

これにより、目的地までの距離が正確に算出でき、走行スケジュールをより高精度に計画し、実行することが可能となった。ナビゲーションシステムは、上記の情報の他にキャンプ可能地点・ガソリンスタンド・商店・病院などの情報も所有している。さらに、グリッドに関しては、5km手前から通過時の走行条件を表示する機能を持たせた(Fig.38)。

10. 2. 4. バッテリスキャナと残容量計

バッテリーの能力を最大限に引き出すためには残容量の把握が必要である。残容量の高精度の検出には算出方法、安定した初期充電量および電圧監視が必要である。残容量は充放電電流の積算を基本とし、電流値やバッテリー温度により充電効率を補正する方式を採用した。各セルの電圧はバッテリスキャナにより常時監視されている。初期充電方法は定電流多段階充電を採用した。酸化銀亜鉛電池の場合、一部のセル電圧が上限に達しても、充電を休止するとさらに充電が可能となる。そこで充電と休止を繰り返すことで、個々のセル間の容量バラツキが最小となり、容量を安定して最大とすることが可能となった。

11. レース結果

1996年10月26日に行われた予選走行では135.34km/h(公式記録)の最高速度を記録し、大会新記録で予選1位を獲得した。

27日からスタートしたレースでは、2日目以降の強風によるエネルギーロスと電気系のトラブルが1回あった

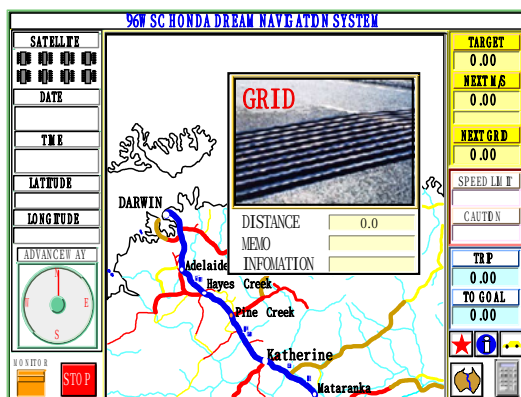


Fig.38 Display of the proprietary navigation system

ものの、パンクなどもなく、レース戦略どうにかつ安全に約3010kmを走破し、所要時間33時間32分、平均車速89.76km/h(公式記録)の大会新記録で二連覇を果たした(Fig.39)。

最後に、96モデルの三面図(Fig.40)および諸元表(Table 5)を示す。

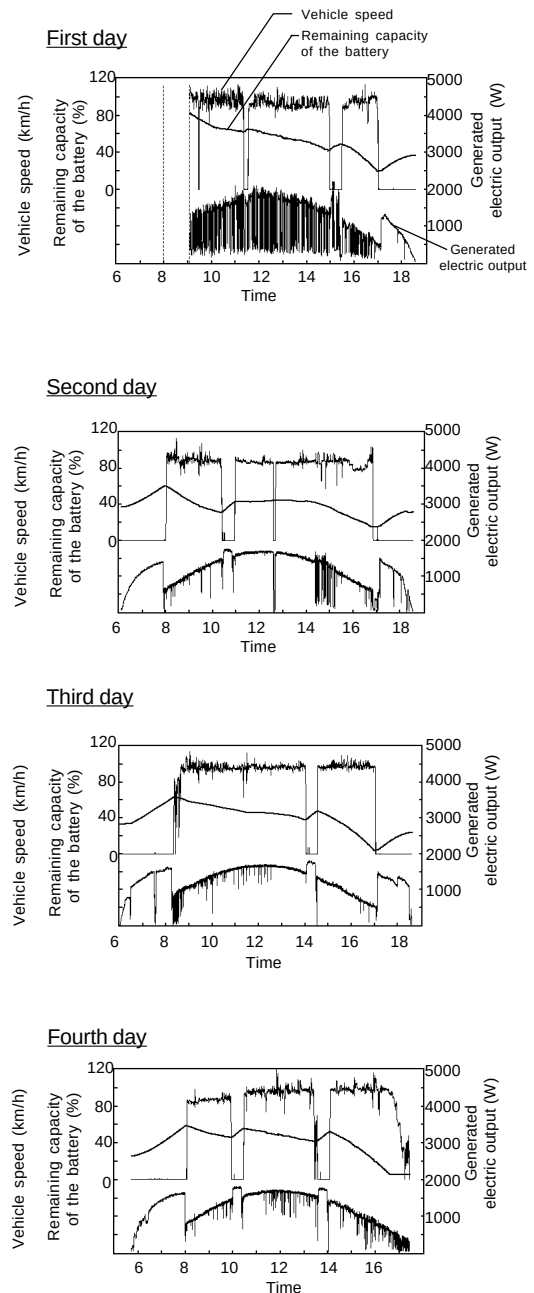


Fig.39 Race data

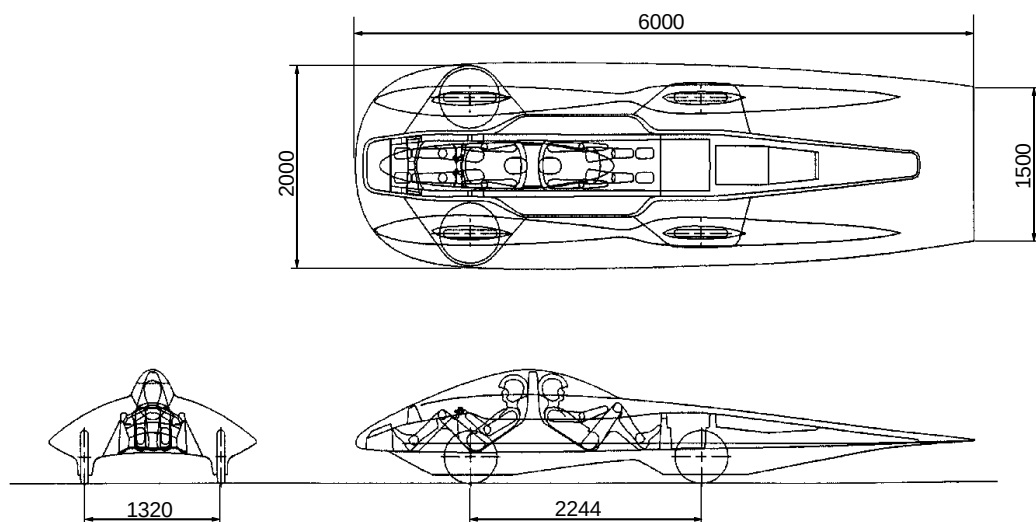


Fig.40 Dimensions of 96Dream

Table 5 Specifications of 96Dream

Overall length×width ×height	6000×2000×1100mm	Solar cells type	Monocrystalline silicon (Made by Univ. of NSW)
Wheelbase	2244mm	Battery	Total output 1.9kW over Silver-zinc batteries
Tread (Fr/Rr)	1320/1320mm		(Made by Yuasa)
Wheel arrangement	2 (front), 2 (rear) (Left-rear wheel drive)	Motor	Nominal capacity 3.24kWh
Total weight	170kg		DC brushless motor
Occupant capacity	2 persons (160kg)	Aerodynamic drag ($C_D \cdot A$)	Maximum power 6kW
Body	CFRP (Aramid honeycomb sandwich structure)		Maximum torque 80Nm
Suspension (Front/Rear)	Double wishbone		Rolling resistance
Brakes (Front/Rear)	Hydraulic drum/hydraulic rim		0.00229
Tires (Front/Rear)	65/80-16 (Made by Michelin)	Cruising speed on a clear day	Over 90km/h
Steering wheel	Center control type bar handle	Maximum speed	Over 140km/h

12. あとがき

今回のレースで消費した総電力量は約60kWhであり、ガソリンに換算したエネルギー量で約6.5Lとなる。少ない発電エネルギーを低走行抵抗の車両で効率よく走行しなければならないソーラカーは実用化に向けてまだまだ困難な課題が数多くある。しかし、排出物は一切出さない「究極のクリーンカー」であり、未来に多くの可能性を秘めていると言える。

謝 辞

最後に車両の開発、製作にあたり多大なご協力を頂いた方々やお取引各社様に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩田ほか、ソーラー電池動力自動車、Honda R&D Technical Review、Vol.3、1991
- 2) 岩田ほか、ソーラー電池動力自動車1993、Honda R&D Technical Review、Vol.6、1994
- 3) 西川ほか、ソーラーレース車両の空力開発、自動車技術会学術講演会前刷集、No.28、1997
- 4) 西川ほか、ソーラカーの空力開発、自動車技術、Vol.51、No.4、1997
- 5) 清水ほか、ソーラカーの走行戦略システム、自動車技術、Vol.49、No.7、1995

■著 者■



北 川 雅 史



中 村 忠 能



春 松 正 敏



桜 庭 俊 典



砂 田 悟