

ソーラー電池動力自動車 1993

Development of a Solar Powered Vehicle in 1993

岩田 孝 弘* 石野 康 治* 小笠 博 司*
Takahiro Iwata Yasuharu Ishino Hiroshi Ogasa

金杉 克 己** 林 清 孝* 判 田 圭***
Katsumi Kanasugi Kiyotaka Hayashi Kiyoshi Handa

要 旨

1993 年 11 月、The third World Solar Challenge がオーストラリアで開催された。ホンダは第 2 回に引き続いて参加し、GM の持つ記録を破り、世界記録を樹立して優勝を果たした。

1993 年のレースのために新開発したソーラーカーは、前回のモデルを基本に空力特性を改善し、さらに、車体や足回りの新機構、ソーラーセルモジュール、ピークパワートラッカ、ホイールインモータなどの新規開発技術が適用されている。これらの技術についてその概要を紹介、解説する。

ABSTRACT

The third World Solar Challenge was held in Australia in November 1993. In its second time to participate in this race, Honda won, breaking the record held by GM to establish a new world record.

The solar car used in the 1993 race was a newly developed model. It had improved aerodynamic characteristics and featured a new chassis and suspension. The latest technology was used in the design of the solar cell modules, peak power tracker and wheel-in motor. This is an outline of that new solar car.

まえがき

1980 年代に入り、世界各地で開催され始めたソーラーカーレースは、1990 年代になって、開催数、開催地、そして参加台数ともに拡大してきている。

その中であって最も規模が大きく、最も過酷なレースがオーストラリアで行われる World Solar Challenge で北端の町ダーウィンをスタートし、約 3000 km 南下したアデレードの町にゴールする大陸縦断レースであり (Fig. 1)、1987 年にオーストラリアの冒険家ハンス・ソルストラップ氏により始められた。

大会は 3 年毎に開催され、1990 年の第 2 回大会にはホンダから Dream 号が初参加して 2 位となった。そして、1993 年 11 月の第 3 回大会では、新型の Dream 号でレースに参加し、第 1 回大会で GM 社の Sunraycer 号が樹立した世界記録を大幅に更新して優勝を果たした。

本報告では、今回のレースに参加したソーラーカーの概要と適用技術について解説する。

1. レギュレーション

レギュレーションは第 2 回大会とほとんど同じであり¹⁾今回変更された部分についてのみ紹介する。

太陽電池の張り付け可能範囲は、1990 年時の『2×4m』から、『(1.8~2.0)×(4.0~4.44) m の範囲内で、かつ投影面積 8m² 以下』に変更された。

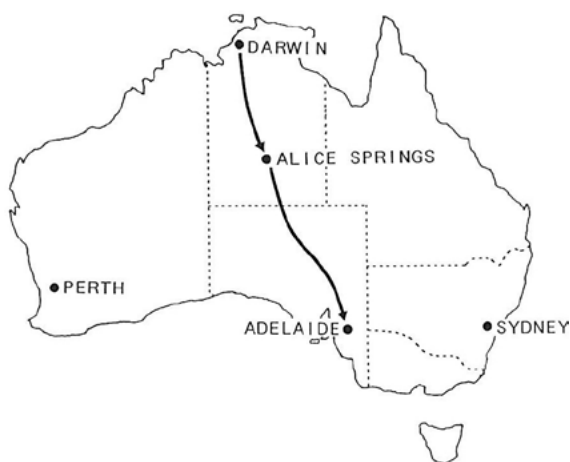


Fig. 1 Race Course

* 和光研究所

** 栃木研究所 朝霞

*** 和光基礎技術研究センター

また、安全性を高める目的から、『ドライバイポイントは70cm以上とし、1人の連続運転は最大6時間に制限するとともに、乗車時は1ℓの水を携帯すること』が義務付けられた。

そして、交通渋滞を回避する目的で『初日の平均車速が38km/h未満の車両は失格』という項目が追加された。

2. 開発目標と達成値

第1回大会の優勝車(GM社のSunracer号)の残した世界記録が更新されずに保持されており、これを塗り替えて優勝することを目標とした。

2.1. ソーラーカーの性能と性能目標

ソーラーカーの性能が巡航速度で代表でき、その巡航速度は発電量と走行抵抗とのバランスで決まることを前報告¹⁾で述べた。Fig. 2の発電量と車速のバランス線図に示すように、前回のレース経験から、59%の晴天率でもSunracer号の記録(44時間54分)を破れる車輛性能を今回の目標として開発を行なった結果、図中に示す値が達成された。

2.2. 各要素の目標設定

Fig. 2に示す車速と必要エネルギーの関係は以下の式で与えられ、性能に係わる各要素について目標値を設定して開発を行なった。Fig. 3に、要素毎の達成値を示す。

$$W = R \times \frac{1}{\eta_e} \times \frac{1}{\eta_m} \quad (\text{走行抵抗} \times \text{効率})$$

$$R = \mu_r \times Wt \times 9.8 \times V + \frac{1.203 \times Cd \times A \times V^3}{2}$$

ここで、W : エネルギー量

R : 走行抵抗

η_e : 電気系の効率

η_m : 機械効率

μ_r : ころがり抵抗係数

Wt : 車両重量

V : 車速

Cd : 空気抵抗係数

A : 前面投影面積

2.3. ゴール到達時間シミュレーション

各要素の達成値を用いてレースコース3013kmのシミュレーションを行い、ゴールまでの所要時間を計算した。その結果、晴天率が100%の場合で36時間、晴天率59%でも44時間30分と10年ぶりの悪天候と言われた1990年の気象条件下でも記録の更新が可能なが確認された。

3. 車体の開発

'93 Dream号の車体主要諸元をTable 1に、全体透視図をFig. 4に示す。

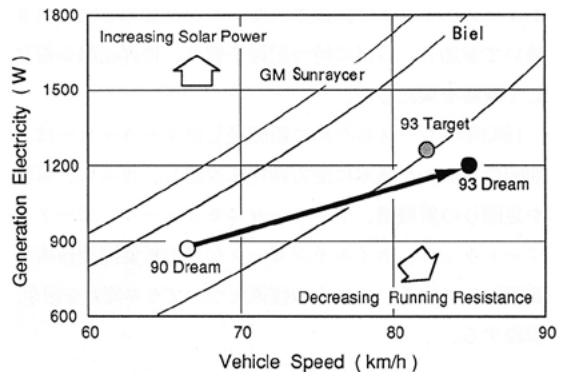


Fig. 2 Diagram of Balanced Speed

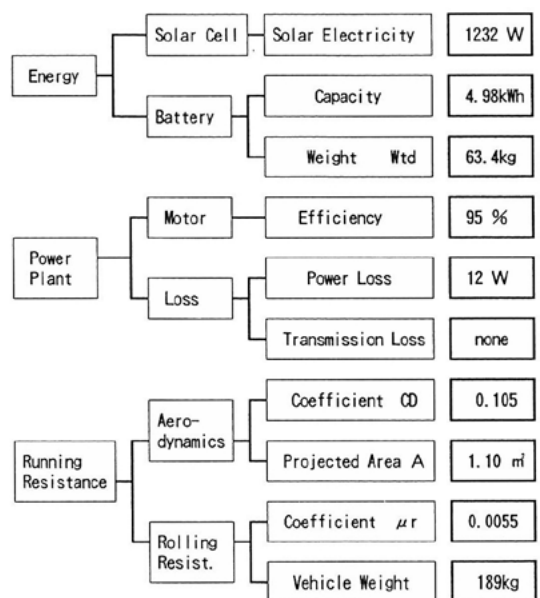


Fig. 3 Accomplished Value of each Factors

Table 1 Specifications of 1993 Dream

Length	5975 mm	Body		Frame+Body Cowl
Width	2000 mm	Tire	Front	2 Wheels (φ550mm)
Hight	1020 mm		Rear	1 Wheel (φ560mm)
Wheel Base	2250 mm	Suspension	Front	Double Wishbone
Tread	1340 mm		Rear	Trailing Arm
Ground Clearance	145 mm	Brake	Front	Leading Trailing Drum
Vehicle Weight	189 kg	Steering Linkage		Wired Pitman Arm
min. Turning Radius	9 m			Bar Type
Stopping Distance	<22m at 30km/h	Driving Method		Direct Drive
max. Speed	140 km/h	Number of Seat		1 person

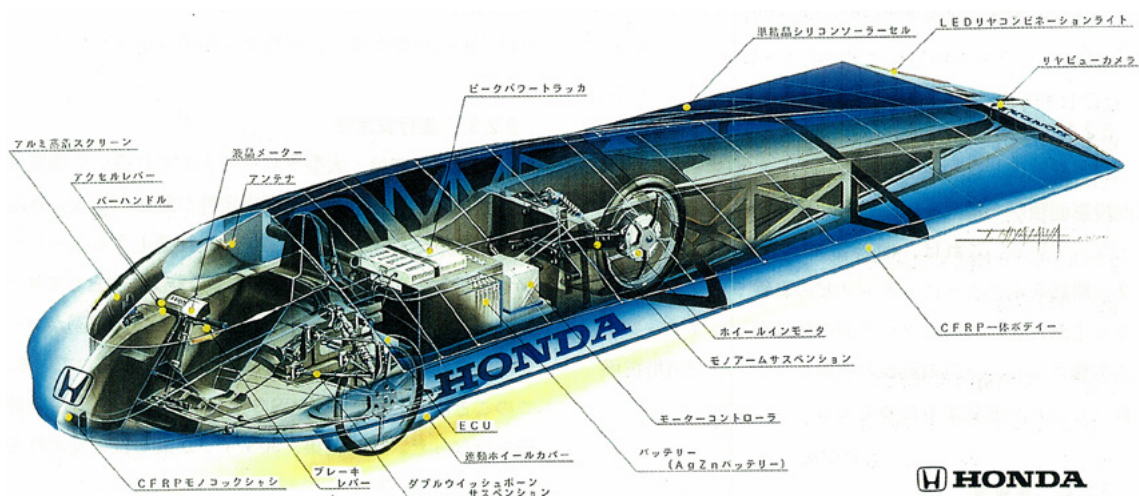


Fig. 4 Perspective Drawing of '93 Dream

3.1. 空力ボディの要件

1990年モデル(90モデル)の車は、風洞実験から得られる空力デザインと、太陽電池がより多く発電できる張り付け面の設定をバランスさせ、背骨の通った一体型ボディ形状を採用した。今回の1993年モデル(93モデル)では、この90モデルを基本として細部形状のリファインを含めた風洞実験を繰り返し行い、同じデザインコンセプトではあるが、新たな特徴を持つ新形状(Fig. 5)が得られた。空力性能としても、前回モデルより13%低い0.105のCD値を達成した。

ソーラーカーの性能は発電量と走行抵抗とのバランスで決まるため、性能を上げるためには、走行抵抗の低減と、発電量の増加をバランスした性能の向上をさせる必

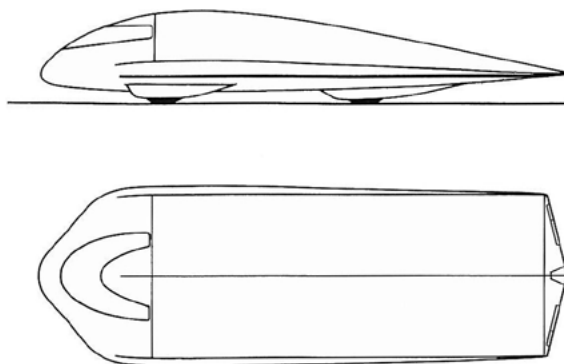


Fig. 5 New Body Design for '93 Dream

要がある。

90 モデルは、走行抵抗を重視した空力形状であり、これをベースとして、今回は発電量も考慮し、トータル性能を向上させることを開発の基本コンセプトとした。そのため空気抵抗 ($CD \cdot A$) はもとより、発電効率も充分に考慮してボディ形状の決定を行なうこととした。

3.2. 空気抵抗と発電量

基本的な形状差が性能に及ぼす影響を確認し、93 モデルの基本形状を決定するため、Fig. 6 に示す4つのタイプの1/6 クレイモデルによって比較検討を行なった。

テストの結果をまとめて Table 2 に示す。総合的には、空気抵抗と発電量のバランスから得られる1日の走行距離で見ると90 タイプとC タイプに絞られ、走行安定性も含めて90 モデルを基本形状として開発を行なうこととした。

3.2.1. 空気抵抗

空気抵抗は、空力性能中心に開発した90 タイプが、全面投影面積が一番大きいにもかかわらず、最も良い結果となっている。これは、他の3タイプで見ると、Fig. 7 に略図を示すように、キャノピの影響や、ソーラーセルを上面に置くためにフロア面の後部がヒップアップする影響により、空気の流れの剥離が増加して空気抵抗係数 (CD) が悪化するためである。

3.2.2. 発電量

発電量を決める要素にソーラーセル面積がある。規定では投影面積で $8m^2$ 以下とされており、その範囲内であ

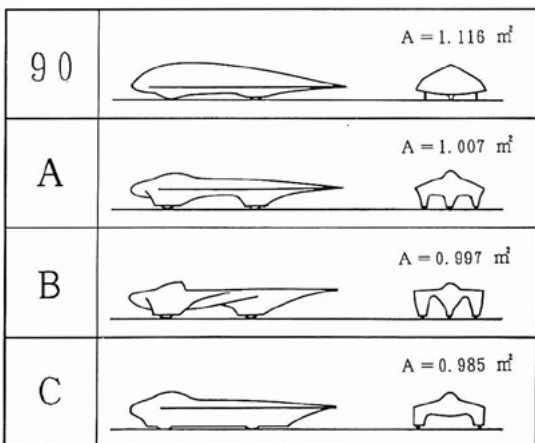


Fig. 6 Evaluated Body Designs

Table 2 Test Results of Body Designs

Type		90	A	B	C
Air Resist	CD	0.096	0.145	0.180	0.131
	A m²	1.116	1.007	0.997	0.986
	CDA	0.107	0.146	0.179	0.129
Power	Fine kWh	12.18	12.34	12.34	13.14
	Cloud kWh	4.74	4.54	4.54	4.92
Distance km		713	697	631	714
Wind	CYM15°	0.337	0.370	0.361	0.497
	CS15°	0.620	0.742	1.276	1.023

れば張り方は自由である。したがって、実質面積の広い、散乱光利用のサイドパネルをもつCタイプが有利である。

また、フラット面にソーラーセルを張るA、Bタイプは、大型のセルが使用できて発電効率は良くなるが、張り付け面に角度が無く、実質セル面積は小さくなる。

3.2.3. 走行安定性

レースカーでは、大型トレーラとのすれ違いや横風などの外乱を受けた場合の走行安定性が問題となる。外乱に対する車体の安定性は、車体中心に発生するヨーレートで表すことができる。横風の場合、空気入力としてヨーイングモーメント (CYM) とサイドフォース (CS) がヨーレートに大きな影響を与えることが一般に知られている。このことから、CYM と CS の変化を調べて安定性の評価を行なった。その結果、90 タイプが最も良い安定性を示した。(Fig. 7)

3.3. ソーラーセル貼り付け面

3.3.1. ソーラーセルの貼り方

ソーラーセルは、貼り付け面の分割が多いほど張り付け効率が低下する。90 モデルでは4分割した面にソー

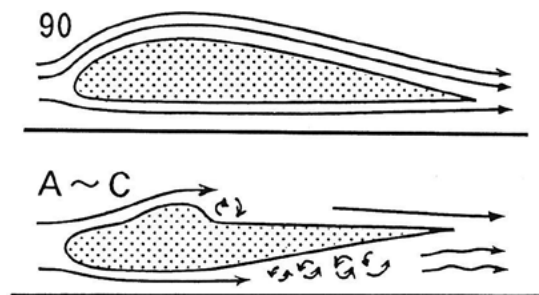


Fig. 7 Aerodynamic Drag and Vortices

ラーセルを貼り付けていたが、今回は2分割した面で形状を成立させ、貼り付け効率の向上を図った。その結果、形状の改善で発電量を6.5%上げることができた。

3.3.2. ソーラーセル面積

ソーラーセルの張り付け面積(セル面積)と発電量は比例し、車体形状は走行抵抗(CD)値とセル面積の関係を考慮して決めることが重要である。

車体形状の上で、この関係に最も影響のあるのが Plane View で見た後部の絞り込み形状である。後部絞り込みによる CD 値変化と発電量変化を比較して Fig. 8 に示す。

この結果、絞り込み量が増えると、CD 値は徐々に減少するが、発電量はある点(図中④→③)から急激に低下する。したがって、最も巡行速度が速く、走行距離を延ばせる図中④の形状を採用した。

3.4. 空気抵抗低減手法

空気抵抗は、Table 3 に示すように、大別して3つに分けられ、そのほとんどが車体形状に起因する。

93 モデルは 90 モデルと基本的形状構成は同じであり、

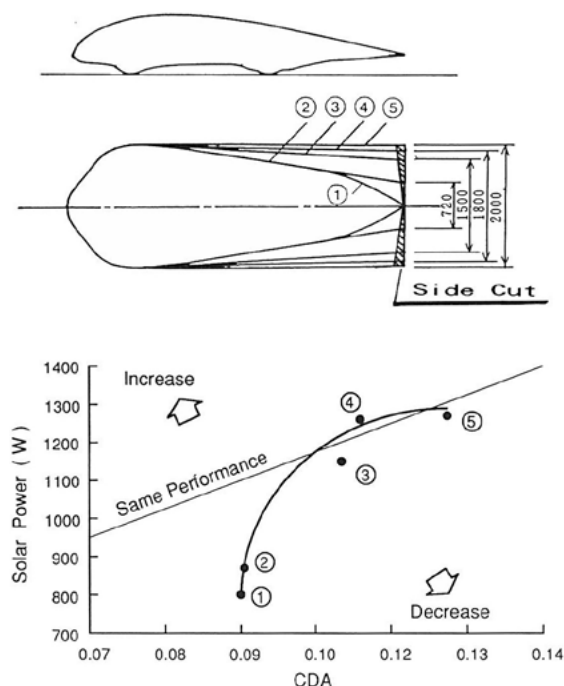


Fig. 8 CD and Generation Electricity Characteristics with Rear Design

Table 3 Grouping of Air Resistance

Air Resistance	Surface Pressure by Separating Air Flow	94%
	Resistance at Opening Area & Wheel Base	5%
	Air Viscocious Resistance	1%

形状リファインだけでは、大幅な性能改善は難しい。そこで、タイヤと車体の隙間などに発生する内部抵抗や、メンテナンスごとに2分割カウルの継ぎ目が微妙に変わることによる空気抵抗の変化(形状再現性)にも着目して実走行状態での空気抵抗低減を検討した。

その結果、Fig. 9 に開発過程でのデータで示すように、基本形状のリファインではごく僅かの低減にとどまっているが、実車状態での対策では大幅な低減が図られ、最終仕様では 90 モデルに比べ 13% の低減効果が得られた。

3.4.1. モデルによる形状リファイン

車体形状は 90 モデルを基本として、車体周囲の空気の流れを可視化し、問題となる部分について改善を加えた。

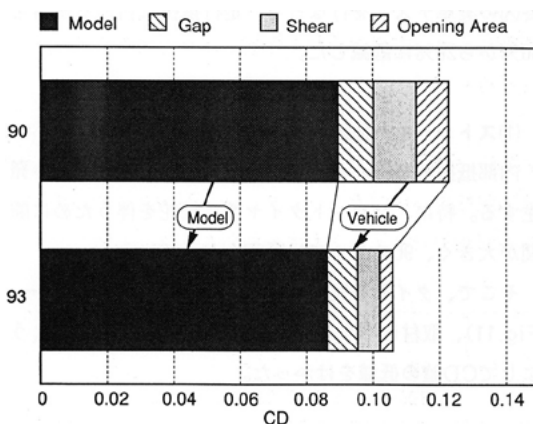


Fig. 9 Reduction of Air Resistance

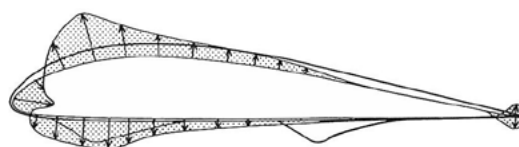


Fig. 10 Body Pressure Distribution

まず、Side Viewにおける、車体表面圧力を測定し、車体の中でCDに敏感な箇所を見いだした (Fig. 10)。

その結果、ノーズ付近、フロントフロア (タイヤ付近) 廻りの圧力が高く、CDに対する寄与度の高いことがわかった。さらに、ノーズの改良は、油滴法で流れを解析して、細かなリファインを行なった。

また、フロントフロア廻りは後述する実車テストにおいて改良を図った。

車体上面は、ソーラーセルを張り付けるため、発電効率を考慮した形状をとることが必要である。さらに、後部上面は、3次元造的形から2次元造的形に変化していく部分であり、空気の流れから見て剥離が発生し易い。そのため、油膜法を用いた剥離域の把握を行ない、剥離域が最も少なく、かつソーラーセルの発電効率が良い形状を見いだした。また、車体後部サイドは、翼という翼端にあたり、気流の渦が発生し易い。そこで、Fig. 8の中に示すサイドカットを出来るだけ大きくとって渦を小さくする形状を設定した。

3.4.2. 実車における改善

実際の車においては、形状モデルだけでは確認出来ない実車体構造での内部抵抗などの要因が加わる。これら要因の実車テストを行なって、走行抵抗に占める割合を30%から20%に低減した。

(1) ストレーキー一体連動ホイールカバー

内部抵抗のほとんどは、タイヤと車体の隙間により発生する。特に、フロントタイヤ部は転舵を伴うために隙間が大きく、90モデルでは懸案となっていた。

そこで、タイヤを完全に包み込み (フルホイールカバー、Fig. 11)、取付けパネル (Fig. 12) ごと転舵できるようにしてCD値の低減をはかった。

(2) 正確な形状再現

ノーズ部分の形状はCD値に対して敏感である。90モデルでは、アッパーカウルをフロントカウル、センターピラー、リアカウルの3部構成にしたが、走行を重ねる毎に継ぎ目に歪みが生じて空気抵抗が増加した。したがって、正確な形状再現性を得るために車体を上下2分割にし、先端から後端まで1ピースの仕様とした。(Fig. 12)

3.5. ボディ構造

車輻の性能向上により走行速度が速くなり、長時間の高速走行におけるドライバーの負担も増加する。さらに、性能向上のための軽量化や、3013kmを走破するための耐久性もボディ作りの要件となる。したがって、居住性、性能、耐久の要素を両立させる設計、製作を行った。

3.5.1. シャーシ

シャーシ剛性を上げるため、車両先端から後端までを一体のシャーシとし、かつ、軽量化をはかるため、最適な板厚のカーボン強化プラスチックを袋状にした。

さらに、補強のため、ステアリング軸を受ける部分やフロント／リア・サスペンションを受ける部分にスティフナを装着した。(Fig. 13)

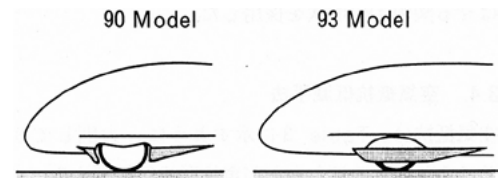


Fig. 11 Comparison between 90 and 93 Wheel Cover

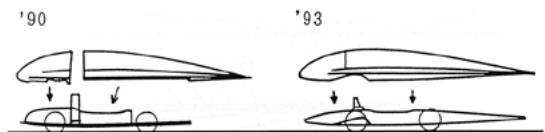


Fig. 12 Comparison between 90 and 93 Upper Cowl Design

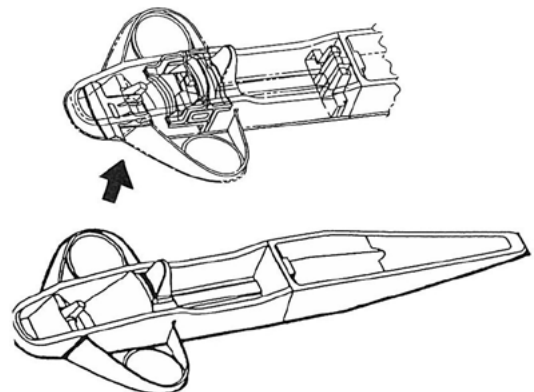


Fig. 13 Reinforcement for Chassis

3.5.2. アッパーカウル

前述のようにアッパーカウルを一体化し、全体の軽量化と剛性の確保のため、カウルの梁部の積層数を増し、内側をリブ構造のスティフナにより補強した。(Fig. 14)

3.6. 足回り

3.6.1. ステアリング

操舵手法は、空力デザイン、車両の重量バランス、ドライバシート位置などから制約を受けた。Fig. 15 に示すように、ハンドルレバー軸のプーリから、ドライバシート下のワイヤを介して、シート後方にあるステアリングプーリを回転させ、左右のホイールに操舵力を伝達回転させる構造を採用した。

3.6.2. サスペンション

フロントサスペンションは前回と同様、車体の上下動に対するトレッドの変化が少ないダブルウィッシュボーンとした。

リヤサスペンションには、駆動モータがダイレクトドライブ方式のホイールインタイプとなったためにホイール全

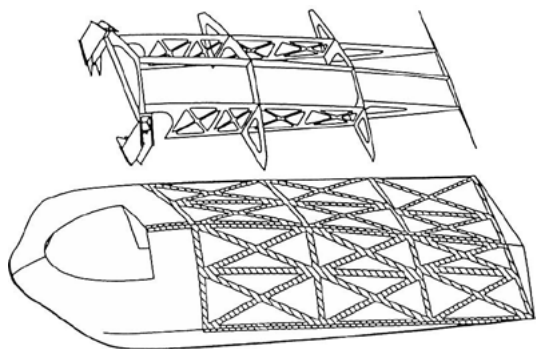


Fig. 14 Reinforcement for Upper Cowl

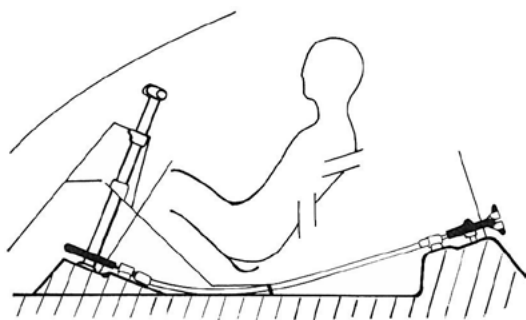


Fig. 15 Steering Linkage

体の重量が増加し、トレーリングアームの補強が必要となった。さらに剛性を上げるとともに、メンテナンス性、軽量化も考慮して中空構造のサスペンションアームを採用した。(Fig. 16)

3.6.3. ブレーキ

90 モデルではフロントブレーキに油圧ディスクを装備していたが、ディスクプレートがボディ床面より出て空力特性を悪化させていた。そのため、今回はホイール内蔵型の油圧式ドラムブレーキを採用した。(Fig. 17)

3.6.4. 低走行抵抗タイヤ

タイヤに求められる要件としては、低いころがり抵抗、耐パンク性、耐摩耗性などが上げられる。また、レースコースの道路上には、家畜の逃走を防ぐグリッドと呼ばれる 10cm 程の間隔で、レールを敷いた溝があり、この上を走り抜ける時の衝撃にも耐えなければならない。これらの条件から、設計検討および試作テストを行ない、

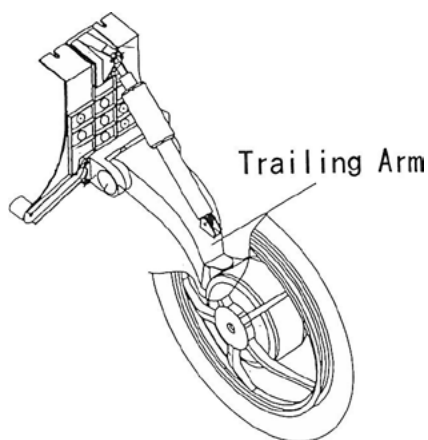


Fig. 16 Rear Suspension

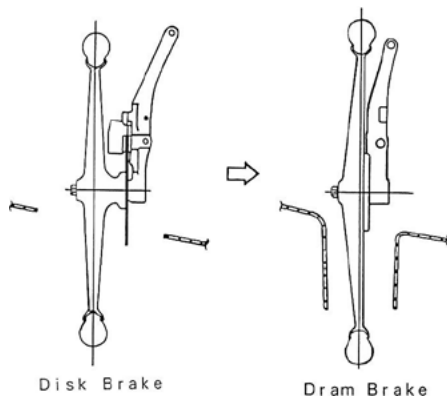


Fig. 17 Brake Type

外径 550mm×幅 45mm の特殊仕様の自転車用タイヤを採用した。これにより、ころがり抵抗は 0.00375 以下となった。

4. 太陽電池の開発

4.1. ソーラーセルの選定

太陽電池（ソーラーセル）は、ソーラーカーの最重要コンポーネントの一つである。

高性能ソーラーセルの種類としては、GaAs(ガリ砒素)単結晶セルと単結晶シリコンセルとがある。ガリ砒素セルは効率、温度特性ともにシリコンセルより優れているが、高価であるとともに、レースでのエントリクラスも異なる。近年、シリコンセルの性能向上は著しく、準量産レベルではガリ砒素セルに近い性能が得られている。

今回のレースでは、サンパワー社(米国)の単結晶シリコン型のソーラーセルを採用した。これは、表面に電

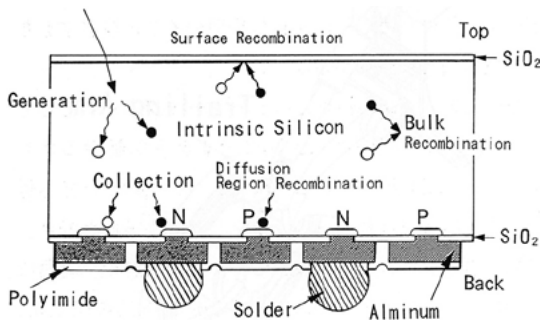


Fig. 18 Solar Cell Structure

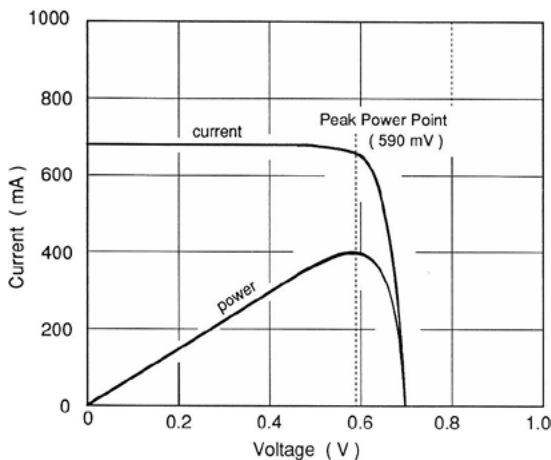


Fig. 19 Conversion Efficiency of Solar Module

Table 4 Specification of Solar Module

Total Number of Cell	4682 piece
Main Cell Number	(240×2 par.) × 8 ch (191×2 par.) × 2 ch
Module Efficiency	20.3 %
Rated Power	1500 W
Effective Stick Area	8.8 m ²
Stick Efficiency	94.1 %
Total Weight	27.034 kg

極の無い裏面電極型 (Fig. 18) であり、電極の影がセル面にできないためその分のロスが無い。セル単体の電流、電圧、効率特性を Fig. 19 に示す。最大出力点は日射量や温度によって異なるが、標準状態 (1000W/m²、25℃) で 580mV 付近である。

レースカーでは、このセルを 4682 枚使用し、セル単体の平均発電効率 21.2% が得られた (Table 4)。また、この値は、Fig. 20 に示すように、準量産セルでも研究室レベルに極めて近い性能を実現したものとなっている。

4.2. ソーラーパネルの設計

4.2.1. 直列セル数の設定

ひとつのソーラーセルは Fig. 19 で示したように、0.6V 程度の電圧しかなく、複数のセルを直列につなげたソーラーパネルとして使用する。つなげるセル数は、バッテリーやモータの使用電圧に係わってくるため、レース中の様々な使用条件を考慮して 240 セル及び 191 セルとした。

4.2.2. 走行中のソーラーパネル温度

ソーラーセルの発電効率は温度が上がると低下するため、なるべく低い温度で使用することが望ましい。

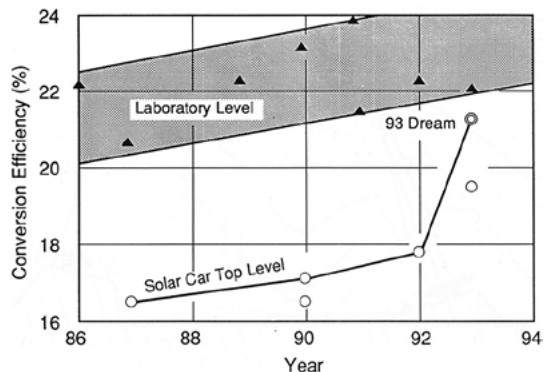


Fig. 20 Generation Electricity of Solar Cell

Fig. 21 に使用したソーラーセルの温度効率特性を示す。この図より、温度が 10°C 上昇すると、出力は 3.6% 低下することが分かる。

実際のレースでは、太陽光を受けてソーラーパネルの温度が上昇するが、一方では走行風による表面冷却もある。Fig. 22 に実際のレースで測定したソーラーパネル裏面の温度変化を示す。走行中は、走行風によって冷却されるため、外気温 $+13^{\circ}\text{C}$ 程度である。ただし、メディアストップでの 10 分間の停車中は、一時的にさらに 20°C 近く高くなることがわかる。

開発段階では、実用条件下でのパネル温度を把握するために、小型簡易風洞を造り実験を行なった。実験に際して、ソーラーセル保護を目的としたラミネート処理の影響もテストした。

この結果 (Fig. 23)、走行風によってパネル温度は大幅に変化するとともに、表面材料 (ラミネート材) の

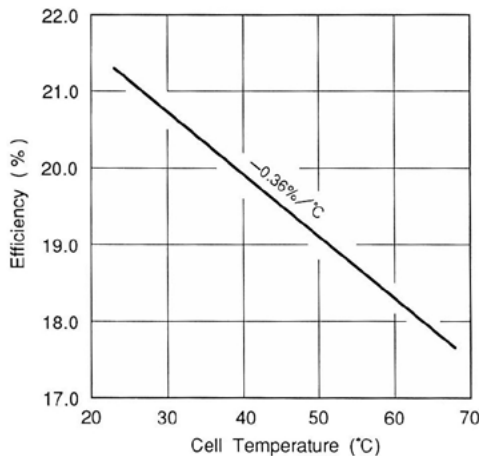


Fig. 21 Influence of Temperature for Electric Efficiency

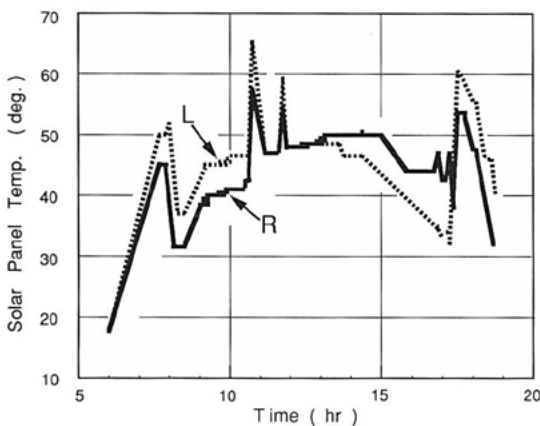


Fig. 22 Solar Panel Temperature

違いによっても変わることが分かる。また、ラミネート材は薄い方が温度が低くなるが、ソーラーセルを保護するために必要な表面強度が得られる範囲に設定される。

また、ソーラーパネルの裏面に空気を流して冷却を試みる裏面冷却もテストしたが、走行中は走行風による表面冷却が支配的であり、ほとんど効果がなかった。

4.2.3. モジュール表面テクスチャー加工

ソーラーセルは、保護のため表面をアクリル材などでラミネートして使用される。このラミネートされた状態をモジュールと呼ぶ。太陽光線がアクリル板に垂直入射する時でも、入射量の 4% が表面反射され、入射角が浅くなるに従って反射量は増加する。ソーラーモジュールでは、この表面反射をできるだけ減らして、太陽エネルギーを効率良く入力することが重要である。

この反射低減のために一般に用いられている手法は、Anti Reflect Coating (ARC) である。これは、特定の角度から入射される光線の反射を抑える働きがある反面、それ以外の入射角では反射率が増加してしまう。ソーラーカーの場合、モジュールと太陽の相対角度を一定に保てないため、この ARC を用いることは必ずしも入射量の増加につながらない。

そのため、Dream 号用のソーラーモジュールとしては、アクリル板表面に Fig. 24 に示すような断面のストレート溝加工を施した。この溝により、反射した光も再入射する機会が与えられる。また、一端入射した光は、空気とアクリルの屈折率の違いによる全反射や、溝角のプリズム効果によってモジュール内部に閉じ込められる。これにより、傾斜入射や内部反射による光エネルギーの入

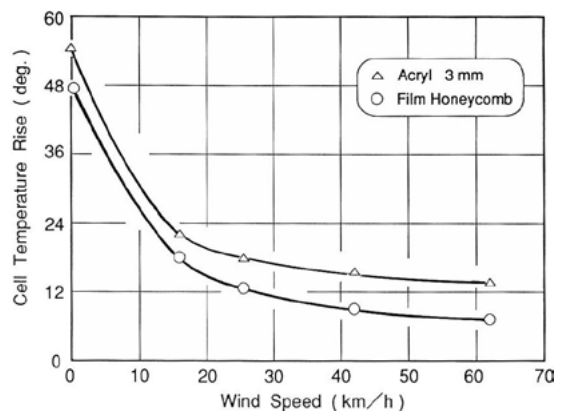


Fig. 23 Relationships between Cell Temperature and Wind Speed

力損失を少なくして、裸のソーラーセルとモジュール化した後の発電性能の差を少なくすることができた。

4.2.4. チャンネル分割

Dream 号は、空気抵抗を低減するために、ソーラーパネルを張る面は3次曲面となっている。したがって、パネルを貼り付ける場所により日射条件が異なる。

ソーラーパネルの特性として、直列に接続されたソーラーセルの個々の間に日射条件(日射量)の差があると、個々のセルの発電電流に差が生じ、最も電流の少ないセルでパネル全体の電流が制限される(曲面ロス)。

この曲面ロスをできるだけ小さく抑え、さらにソーラーモジュールが損傷した時の全体の発電能力に及ぼすダメージを少なくするためにセルサイズを小型化し、1チャンネル当たり240セル×2枚を並列で構成するとともに、日射量の近いモジュールどうしを組み合わせたと。車体形状の制約から240セルに満たない所は191セルとした。この結果、ソーラーセルの貼り付け効率は94.1%に達した。

4.3. 太陽電池のモジュール化技術

前述のように、ソーラーセルは非常に脆く、壊れやすいため、レース環境で使用できるようにパッケージング(モジュール)を施す必要がある。93モデルの開発では社内でのパッケージングに取り組み、各要件を満足するモジュールを製作することができた。

4.3.1. 目標の設定

モジュールに要求される性能、耐久要件は、オーストラリアでのレース環境を想定して設定した。

特に熱的な問題が重要であり、モジュールを構成する材料は、冷却性が良く、発電損失が少ないものを選択し

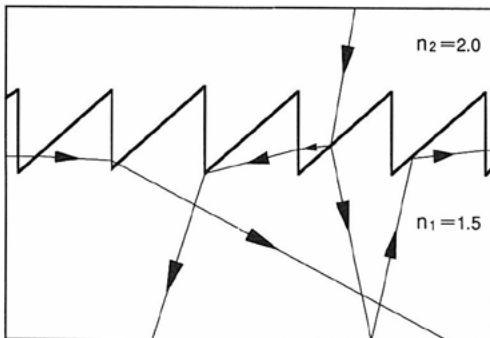


Fig. 24 Surface Structure of Solar Module

Table 5 Materials of Solar Module

	90 Model	93 Model
Surface	Poly-vinyl-fluoride-Film	Acrylic acid Resin
Adhesive	Ethylene-vinyl acetate copolymer	Silicone Resin
Reverse	Poly-vinyl-fluoride-Film	Poly-vinyl-fluoride-Film

た。また、耐久性としては、レース期間を通じて初期性能が維持できることとし、赤道越えでの輸送、砂漠気候への適応性などから要件を設定し、さらに実車搭載性も考慮した。

4.3.2. 構成材料の検討

各部材の要件を Fig. 25 に示す。各種材料についてそれぞれ試作評価を行なって材料の選定を行なった。

90モデルと93モデルの各部材を Table 5 に示す。表面材は光透過性に優れ、表面保護能力の高いアクリルを選定した。接着剤はフィルム状のEVAシートより作業性では劣るが光透過性の優れたシリコン樹脂を選定した。また、裏面材は90モデルと同一のものをを使用した。

4.3.3. 製作方法の開発

選定した材料では、一般に用いられている製作方法であるフィルムラミネート法を用いることは出来ず、新しい製作方法の開発が必要となった。

モジュールの製作は、セルの高密度ハンダ接続、シリコン樹脂の調合、真空脱泡、ラミネート、樹脂硬化、外形の整形、出力端子の配線といった多くの工程からなっている。さらに、発電性能試験の実施や、厚さや大きさの均一化などの品質管理も実施して、合計44枚のモジュールを製作した。そして、多くの手法をテストピー

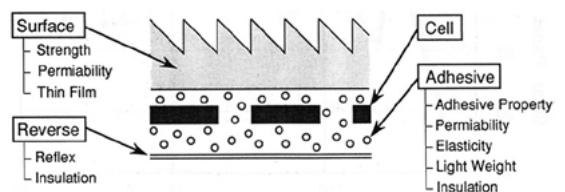


Fig. 25 Requirement for Materials

スレベルで試作試験してモジュール製作工程の最適化を行なった。

4.3.4. モジュールの性能評価

レースカー用に生産したソーラーセルの中から、高い効率の得られた 48 枚を選んで、レース仕様と同じ作り方でモジュールを試作して評価した。このモジュールを米国のサンディア国立研究所にて測定した結果、変換効率 21.6% の値が得られた。この値は、従来、豪州、ニューサウスウェールズ大の記録した最も高い効率 (20.5%) を上回るものであった。

4.4. ピーク・パワー・トラッカの開発

4.4.1. ソーラーセルの発電特性

ソーラーセルの発電特性は、Fig. 26 に示すように定電流電源の特性に近い。したがって、電力 (電圧×電流) の値が最大になる点 (パワーピークポイント) で常に動作させることにより、最大の発電性能が得られる。このポイントは温度や太陽光の強弱によって変化する。一方、発電電力を受けるバッテリーの電圧も、充電容量と充放電電力によって大きく変化する。したがって、太陽電池と負荷 (モータと蓄電池) の間にピークパワートラッカ (以下 PPT と略す) を設けて、常にセルのピーク電力の得られる点を追跡して最大発電性能が得られるように制御した。PPT は、Dream 号の発電量に合わせて、社内独自に開発を行なった。

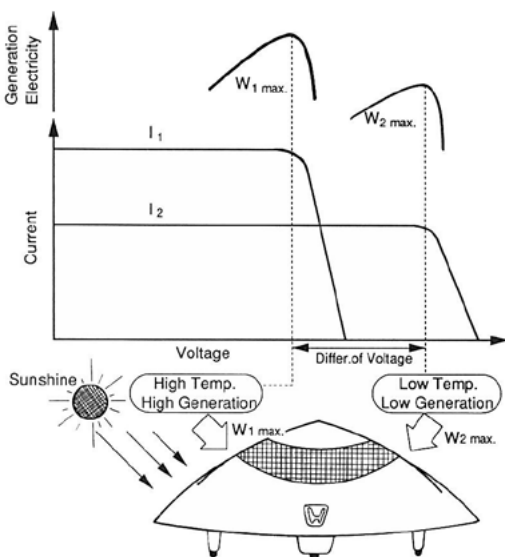


Fig. 26 Generation Characteristics of Solar Cell

4.4.2. PPT

現在、1～2 社がソーラーカー用 PPT を製作しているが、コストと制御性の容易さからアナログ回路を用いた方式である。PPT の働きも、実際のセルのピークパワーを追跡するのではなく、簡易的に決められた入力電圧に固定するタイプが主で、実際のピーク電力追跡精度はあまり良くない。

したがって、より精度の高いピーク電力追跡を行なうために、新たにデジタル回路を用いた PPT を開発し、最終的には Fig. 27 に示すように、単体で最大 98% 以上の変換効率と 99% 以上のピーク電力追跡性能を得た。

PPT に必要な条件は、エネルギー変換効率が高いことと、ピーク追跡精度が高いことがあげられ、ソーラーカーに搭載することから軽量であることも必要になる。

ソーラーカーはセル張り付け面が曲面で、均一に日射を受けない (Fig. 26) ため、セルチャンネル数にあわせて 10 チャンネルの PPT コンバータを持たせた。

PPT の諸元を Table 6 に示す。PPT の要件として、レース走行中のセルピーク電圧とバッテリー電圧差が少ない状態で用いること、セル逆流防止ダイオードを内蔵化すること、パワー素子耐圧限界の確保と素子損失を低減することの 3 点を満足するために、PPT 本体は非絶縁型昇圧タイプ PWM コンバータとし、エネルギー変換効率を高くとれるようにした。

また、制御手法は、ピーク追跡精度を高くとり、セルの電圧、電流から電力を計算して常にセルのピーク電力

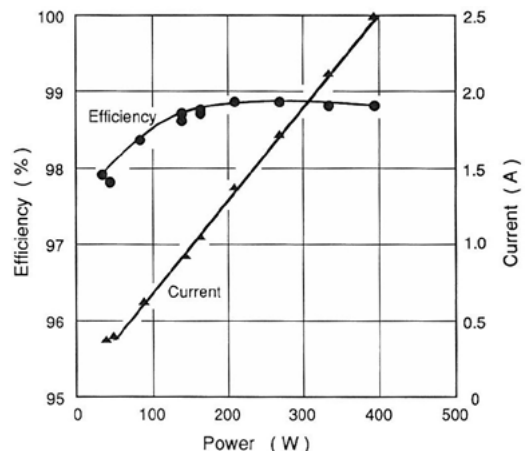


Fig. 27 Solar Cell Efficiency with Peak Power Tracker

Table 6 PPT Specifications

Tracking Mode	Real time digital operation
Control Method	10ch PWM Control
Peak Efficiency	98 %
Tracking Efficiency	> 99 %
Weight	3.504 kg

点で使用されるようにフィードバック制御する全チャンネルを集約した逐次変換式電力制御タイプとした。

PPTを用いることにより、90 モデルでは平均 80% ししか生かせなかったソーラーセルの発電能力を、ほぼ 98% 引き出すことができた。(Fig. 28)

5. ソーラーカー用モータ

5.1. ソーラーカー用モータ

近年、永久磁石を用いた DC ブラシレスモータの最高効率率は 90% を越えており、モータそのものの効率改善のみでは大きな向上は望めない。そこで、モータを効率良く使うという観点から、バッテリー以降タイヤまでの駆動系全体に視野を広げて開発を行なった。

レースはほとんどが平坦路の巡航走行となるため、モータの使用域は狭い範囲に限定される。したがって、駆動系全体としても、かなり効率の高い領域の使用が大部分を占めることになり、わずかな損失の低減の積み重ねが全体の効率向上にとって重要である。

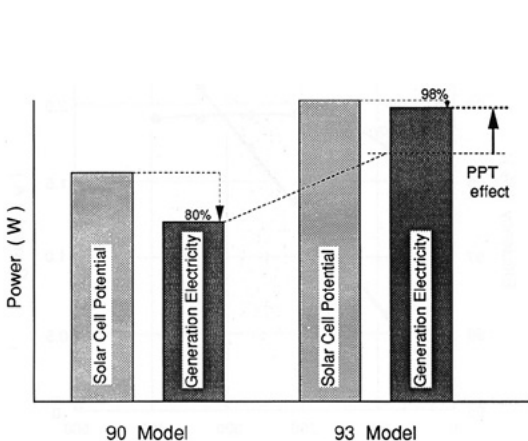


Fig. 28 Effect of PPT for Generation Electricity

バッテリー以降タイヤまでの駆動系損失は次の 4 つに大別される。

- (1) モータおよびモータドライバ損失
- (2) 減速機での損失
- (3) タイヤこもり抵抗による損失
- (4) その他、導線等での損失

以上のことから、93 モデルの駆動系の開発は、以下の 3 点を柱に進められた。

- (1) 減速機の廃止
- (2) 最多使用回転域をモータ最高効率点に一致させる
- (3) モータおよびドライバの損失低減

5.2. モータの高効率化

5.2.1. ホイルインモータ

90 モデルはチェーン駆動であったが、93 モデルでは、減速機での損失を無くするため、ホイルインモータを採用して直接タイヤを駆動する方式を採用した。

ホイルインモータにすることにより、減速機での損失が無くなるとともに、回転軸が 1 軸減るために軸受けの回転損失を低減することができる (Fig. 29)。また、さらにチェーン破損によるトラブルも回避することができ。ただし、減速機によるモータ使用域の最適化ができず、高トルク型モータ使用による重量の増加、バネ下荷重の増加による耐振性能の悪化、その結果生じるタイヤやホイールの破損などの問題点もあり、それぞれに対策が必要であった。

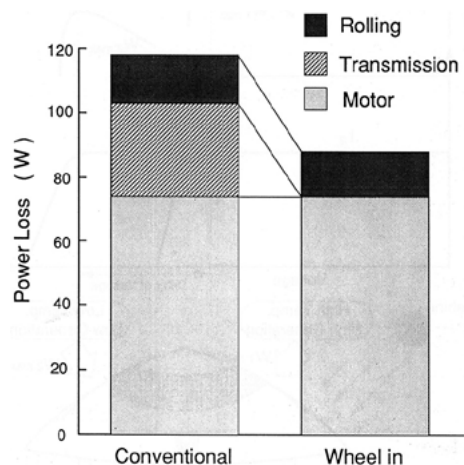


Fig. 29 Power Loss of Solar Car

5.2.2. 最高効率点の使用

モータの最高効率点を巡航速度に合わせた場合、特別な制御なしで最高速まで全域走行する場合に対し、4%程度の効率向上が見込まれる。しかしながら、そのままでは追い越し時に必要なモータ回転数が得られないため他の補助手段(多段変速機など)が必要になる。

93モデルでは、変速機を使わないため、磁石の強さを、等価的に弱めて回転を上げる「等価界磁弱め制御」を導入して、モータの最高効率点を巡航速度に合わせることを可能にした。

5.2.3. モータおよびドライバの損失低減

モータおよびドライバの損失低減は、次のように分類される。

- (1) 鉄損 : ヒステリシス損および渦電流損
- (2) 銅損 : 導体抵抗によるジュール熱損
- (3) 回転損 : ベアリングころがり損、風損
- (4) ドライバ駆動損失
- (5) 補機損失 : 冷却ファン、ゲートドライバなど

(1) 鉄損の低減

鉄損の低減には、磁気回路の最適化と、磁気特性に優れた材料の選択が有効である。磁気回路の最適化には磁場シミュレーションを用い、最大磁束密度を高く設定し、トルク定数の頭打ちを回避して、鉄芯使用量を減らした。これにより空いたスペースは巻き線に割り当て、導線断面積を大きくして巻き線抵抗を低減した。

鉄芯材料は、磁気特性に優れた6.5%珪素鋼板を採用した。この材料は、飽和磁束密度、加工性に難があるがヒステリシス損が少なく、渦電流に対する通電抵抗が高い。さらに、渦電流損低減のために0.1mm厚の薄板の積層構造とした。

(2) 銅損の低減

銅損はジュール熱($R \times I^2$)で表され、導線抵抗もしくは電流値を低減すれば下げることができる。

導線抵抗の低減は設計段階で十分な巻き線スペースを確保すれば良いが、モータの大型化、重量増加につながる。したがって、試作手法の改善によって通常35%の巻き線密度を50%に上げた。また、温度上昇による巻き線抵抗の増加を抑えるため、巻き線の冷却性も考慮した構造とした。

一方、電流値の低減は、逆起電圧を高め、電流位相の適切な制御により行なった。モータの効率を上げるために、磁束と電流ベクトルを正確に直交させ、正弦波に近づけて高周波成分を無くすように制御した。

(3) その他の損失低減

回転損は、ベアリングのころがり損(シールフリクション)がほとんどであり、耐水、耐塵性をなどを考慮して、非接触シールは用いず、シール箇所の減少、シール径の縮小、回転速度の低減で対応した。

ドライバへの電力供給は、パワー素子を介して行なうが、スイッチング時に生じる損失はその回数に比例する。スイッチングを早くすると損失は低減するが、スナバ電圧が発生して素子を破壊するため、損失の少ないスナバ回路を用いた。

その他、補機の損失低減として、放熱フィンなどによる冷却能力の向上、冷却ファンの廃止、ドライバのケース放熱などを行なった。冷却ファンの廃止は、同時に、密閉構造を可能とし、軽量化とともに、耐水、耐塵信頼性の向上に寄与した。

5.3. 93モデルモータ仕様

5.3.1. 基本構造

93モデル用モータの外観図をFig. 30に示す。このモータの構造上の特徴としては次の点が上げられる。

- (1) ホイルインモータ方式
- (2) 磁石回転型同期式三層ACモータ(DCブラシレスモータ)
- (3) インナーロータ式(軸突出し構造)

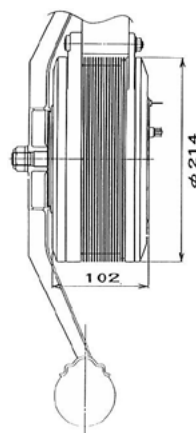


Fig. 30 Schematic View of Wheel-in Motor

- (4) 空気抵抗を軽減するための、究極式巻き線薄型構造
- (5) 耐水、耐塵埃密封型（ファン無し）構造
- (6) 耐振性に優れた、モータ位置検出用磁極センサ

5.3.2. モータの性能

モータの性能を Fig. 31、Table 7 に示す。モータ効率は晴天時巡航速度域（1500W／761～856rpm）で 95%、実用域（400～1000rpm）で 90% 以上、最高効率は 95.5%（1520W／856rpm）が得られた。

5.3.3. モータの制御

効率を高めるために、回転位置と相電流のフィードバック、およびパワー素子のスイッチングにより、電流最適位相制御を行なった。

回転位置は、電気角 120 度位相で取り付けた 3 個の磁極センサを用いて、60 度ごとに検出した。

その結果、最高効率点での相電流は実効値で約 11A、最大トルク時で約 35A となった。

6. 蓄電池

蓄電池は、前回と同様に、過酷な使用条件下での性能が優れた酸化銀・亜鉛蓄電池を採用した。容量は、長時間の悪天候時に備えて、レギュレーションの上限值である 5kWh とした。

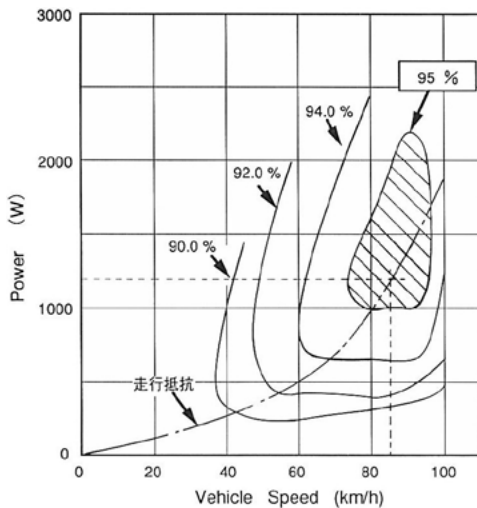


Fig. 31 Motor Performance

Table 7 Motor Specifications

Rated Power	1500 W
Rated Revolution	856 rpm
Torque	17 N-m
Current of Phase	11 A
Motor Constant	1.6 N-m/A
Pole number	12 pole
Size	φ214 ×102 mm
Weight	12.8 kg

7. レース

1993 年 11 月 7 日（日曜日）午前 8 時、前日の予選結果順に 2 列に並んだ 52 台のソーラーカーがダーウィンの海岸道路、エスプラナーデ通りを一斉にスタートした。

Dream 号は、前日の予選が 2 位であり、ピール工大と並んでフロントローからのスタートとなった。

一般車輦の交通量が少なくなるダーウィン市郊外まで白バイがペース車としてソーラーカーの一群を先導し、その間、追い越し禁止のルールが守られたスムーズなスタートとなった。

7.1. 天候

悪天候でスタートを 1 時間遅らせた前回大会とは異なり、予選日を含めて初日、2 日目と晴天に恵まれた。3 日目の午後からゴールのアデレード市が位置する南海岸に近づくに従って雲混じりの空に変わっていった。

Fig. 32 に Dream 号の発電量のモニタ値を示す。グラフ上の斜線部は、雲の影響による発電量の低下分を示しており、全行程を通しての晴天率は 80% 弱であった。

7.2. 発電量

発電量は、快晴に近い 2 日目の 11 時から 13 時頃まで、安定して目標値の 1500W を越えていた。3 日目の日中に 1800W を越えるピーク値が記録されているが、この時は雲がところどころに浮かぶ天候下の走行であり、雲の反射の影響で発電量が高くなった。

7.3. 蓄電

蓄電池は、初日から 3 日目まで、朝夕の蓄電量を日中

の走行時間に使い切る方法で放電し、4日目の曇天下では、天候予測に注目して、精度の高い残容量管理に努め、慎重に放電量を設定管理した。

7.4. レース展開と結果

毎日の走行距離を Table 8 に示す。

レーススタート時に、駆動力不足の異常が発生し、2時間程の検討および対応準備の後、242km 走行したところでリアタイヤがパンクしたため、それを機会にモータシステムを一式交換した。その結果、それまでは平均車速が 75~85km/h しか得られなかったのに対し、交換後は 100km/h 平均にスピードアップし、490km 地点でトップに立つことができた。

レース中、フロントタイヤ2本、リヤタイヤ4本のパンクが発生したが、他に大きなトラブルは無く、順調に

Table 8 Distance Results during Race

Day	Running Distance(km)		Difference from 2nd Car (km)
	Each Day	Total	
1	746	746	23
2	746	1492	66
3	802	2294	131
4	696	2990	289
5	23	3013	—

全行程を走りきった。

そして、所要時間 35 時間 28 分で 3013km を走破し、それまでの世界記録、44 時間 54 分を更新して総合優勝を果たした。

8. あとがき

1993 World Solar Challenge に向けて、前回 (1990 年) のモデルを基本に、新 Dream 号の開発を行った。93 モデルの特徴は、徹底した空力性能の追求により、CD 値 0.105 を達成するとともに、ソーラーセルの大幅な性能向上と PPT の採用によるエネルギー変換効率の大幅な向上、そして、モータの改良などによるエネルギーロス低減が挙げられる。

レースでは、徹底したレースマネジメントを行い、所要時間 35 時間 28 分で優勝することができた。また、今回上位 5 台までが同時に記録を更新する好成績を収めたが、晴天率が 1987 年の世界記録樹立時に近く、それぞれの車で条件は異なるものの、6 年間の技術進化が伺えた。

謝 辞

Dream 号の開発および製作にあたって、多大な御協力をいただきました方々、レースオーガナイザ、レース運営をサポートしていただいた方々に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩田 他、「ソーラー電池動力自動車」、HONDA R&D Technical Review, Vol.3 1991, pp1~11

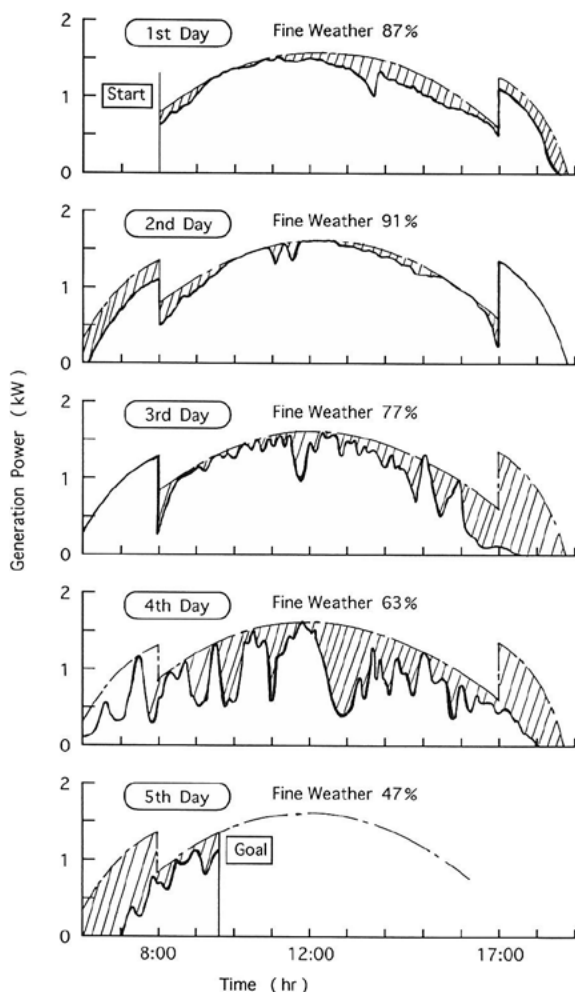


Fig. 32 Electricity Generation of each Day

■著 者■



岩田 孝弘



石野 康治



小笠 博司



金杉 克己



林 清孝



判田 圭