

新型「ドリーム」用ソーラセルモジュールの開発

Development of Solar Cell Module for 96Dream

中 村 忠 久* 荒 晴 哉* 山 田 孝 行*

Tadahisa NAKAMURA Haruya ARA

Takayuki YAMADA

要 旨

1996年の World solar challenge のために開発した新型「ドリーム」は数々の新機構・新技術を採用している。本稿ではこの中で、軽量、低損失で、成形性に優れるソーラセル(太陽電池)モジュールの概要について解説する。

基材は、耐衝撃性、加工性がよく透明性もあるポリカーボネイトとし、光の反射によるエネルギー損失を低減するため、反射防止膜を施した。

この結果、'93年型「ドリーム」に比べ、14%の軽量化と、エネルギー損失を3/4に低減することができた。

ABSTRACT

The 96Dream developed for the World Solar Challenge has many new mechanisms and new technologies. This paper describes the solar cell module with light weight, low loss and excellent formability.

The substrate is made by polycarbonate with good impact strength and workability, and treated with anti-reflection coating for reduction of energy loss.

As a result, we have achieved 14% weight reduction and 3/4 energy loss compared with 93Dream.

1. まえがき

1996年10月、第四回 World solar challenge がオーストラリアで開催された。ホンダは、1993年の第三回に引き続き、大会記録を更新して連続優勝を果たした。数多くのソーラカーレースの中でも、砂漠の中の公道を走る World solar challengeは、最も距離が長く、過酷と言われている。ソーラセルモジュール(以下、モジュール)には、太陽光・砂埃・石はね・車体振動などからソーラセルを保護し、ソーラセルの特性を最大限に引き出して高い発電量を保持することが求められる。

本稿では、当時世界最高レベルであった'93年型「ドリーム」(以下、93モデル)¹⁾のモジュールを更に高効率化した技術を中心に解説する。

2. モジュール化の目的

ソーラセルを実車に貼り付ける方法には、大別して、

- (1)ボディ直貼り
- (2)モジュール化

Table 1 Method of pasting solar cell

	Direct	Module
Merit	• Low incident energy loss	• Protection from external force,dust and water • Good handling • Production in parallel with body
Demerit	• Cell is breakable for external force • Bad handling • Difficult to exchange	• Diminution of incident energy • Increase of weight

の二とおりあり、それぞれ、Table 1の様な特徴がある。

ソーラセルは割れやすいため、外力・砂埃からソーラセルを保護することを最も重視し、ボディと並行製作可能で製作期間の短縮ができるという点も考慮し、モジュール化を採用した。

*栃木研究所

Table 2 Performance target

Item	Performance target
Diminution of energy loss	<4.0%
High density on-board installation	>98.4%
Weight reduction as compared with 93Dream	>10%

3. 開発目標要件

モジュールとして重要な項目は、以下の三つである。

- (1) エネルギー損失の低減(高発電効率)
- (2) ソーラセルの高密度実装
- (3) 軽量化

それぞれの目標値をTable 2に示す。

3.1. エネルギー損失の低減

空気と表面材の様に屈折率が異なる界面では、例えばアクリルの場合には光は両面で8%程度反射する。この反射をいかに抑えるかが、光線透過効率を落とさずに発電させる鍵となる。

詳細は後述するが、93モデルと新型「ドリーム」(以下、96モデル)では、反射防止の考え方が異なる。93モデルでは、モジュールのエネルギー損失は4.2%であったため¹⁾、96モデルのモジュールとしてのエネルギー損失の目標値を4.0%以下と決めた。

3.2. ソーラセルの高密度実装

ソーラカーにおいて、決められた面積の中で発電を多くするためには、無駄なスペースをできるだけ省き、高密度にソーラセルを並べることが重要となる。93モデルでは、実装効率(モジュール1枚当たりのソーラセル面積/モジュール面積)は98.4%であり、今回の目標を93モデル以上とした。

3.3. 軽量化

96モデルの開発コンセプトが、二名乗車(大会規則よりソーラセル投影面積12m²以下)のため、モジュール面積は93モデル(同8m²以下)より大きくなる。したがって、軽量化目標値は、モジュールの単位面積当たりで比較することとし、93モデル実績の10%低減(1m²あたり3.04kg以下)とした。

3.4. その他の確認項目

モジュールが、夏のオーストラリアの厳しい自然環境下での、耐候性・耐熱性・耐水性を有することを確認した。

4. モジュール仕様

4.1. 93モデルの考え方

93モデルでは、Fig.1の様なモジュール構成であった。特徴としては、

- (1) 表面材としてアクリルを使用
 - (2) 鋸歯形状の溝加工
 - (3) 電極によるソーラセル間結合
- の三点であった。

特に、(2)の項目については、朝・昼・夕と太陽からの入射角度が変化しても、表面での反射を最小限に抑える目的で取り入れた独特の構造で、93モデルのモジュールの最大の特徴ともいえる。

しかし、この方法では、

- (1) 鋸歯形状を採用したため、表面材の板厚をある程度確保する必要があり、重量が重くなる。
- (2) 鋸歯形状のため、空力特性を悪化させている。
- (3) ソーラセルの短絡を防ぐためセル間隔が必要となり、モジュール面積の増大、重量増加につながる。
- (4) 鋸歯形状の溝部に砂埃が目詰まりし、光線透過率を悪化させ、発電量が低下する恐れがある。
- (5) 鋸歯形状の加工精度によっては、光の散乱が起こるため、本来の性能を実現できない。

などの課題がある。この課題とそれに対する対応策をTable 3に示し、それぞれについて述べる。

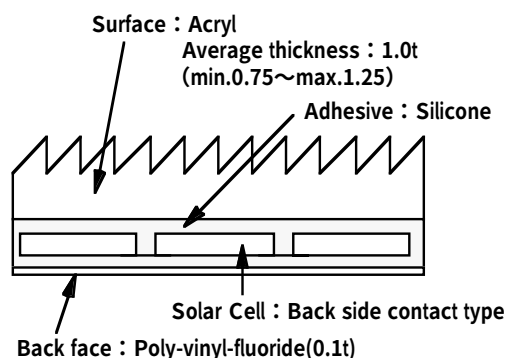


Fig.1 Construction of solar cell module (93Dream)

Table 3 Requirements and measures

Requirement	Measure
(1)Weight reduction	• Development of new surface material
(2)Improvement of aerodynamic characteristics	• Improvement of surface form
(3)Diminution of space between the cells	• Development of optimal anti-reflection coating
(4)Protection from dust	• High density on-board installation
(5)Diminution of reflection	

4. 2. 新表面材開発

表面材の材質選定にあたって、光線透過率・軽量(比重小)の観点より、三種類の材料の比較検討を行った。

(1)アクリル(93モデルで使用)

(2)ポリカーボネイト(PC)

(耐衝撃性が高く薄肉化して軽量化効果あり)

(3)オレフィン材(新材料で比重が小さい)

表面材は、単に一般的な可視光透過率がよだけでなく、ソーラセルの変換効率の波長特性や、太陽光の強度分布を加味した光線透過特性が求められるため、次式が成り立つとして、透過エネルギーと損失を求めた。

透過エネルギー

$$E_t = \int T \times X \times P \, d\lambda$$

損失 = $(E_s - E_t) / E_s$

ここで、

E_s : ソーラセルの発電に寄与するエネルギー

E_t : 透過エネルギー

T : 光線透過率

X : ソーラセル感度

P : 太陽光強度

光線透過率については、詳細は後述するが、基材と反射防止膜(anti-reflection coating、以下、ARコート)の密着耐久性や、基材の屈折率により反射防止効果が変わることなども考慮する必要があるため、ARコート品での性能比較を行った(4. 4. 節参照)。

4. 3. 表面形状適正化

空力性能を向上させ、埃の問題を避けるために、Fig.2に示す平板形状とした。93モデルを使った実車風洞テストでは、鋸歯形状のモジュールを貼った実車より、表面にテープを貼って平板相当とした実車の方が、CD値が0.003向上することが判った。

また、平板にすることで、薄板化が可能になり、軽量化に寄与した。

4. 4. 最適反射防止膜の開発

反射率を低減するために、表面にARコートを採用した。更に、太陽高度やソーラカーのボディ形状による太陽光入射角に合わせた光線透過特性を有するARコートを設計することで、93モデルで鋸歯形状が果たしていた入射角依存性を小さくするという効果をもたせた。

反射防止のメカニズムは次のとおりである。

Fig.3において、入射光の一部は境界面Ⅰで反射され(A)、残りは薄膜内を進み、境界面Ⅱでその一部が反射され(B)、残りがソーラセルに到達する(C)。

このとき反射光AとBは互いに干渉するから、AとBの振幅を等しく、位相を逆にしてやれば、打ち消しあって反射光はゼロとなり透過光は最大となる。

屈折率 n_1 の物質から n_2 の物質に垂直光が透過する場合

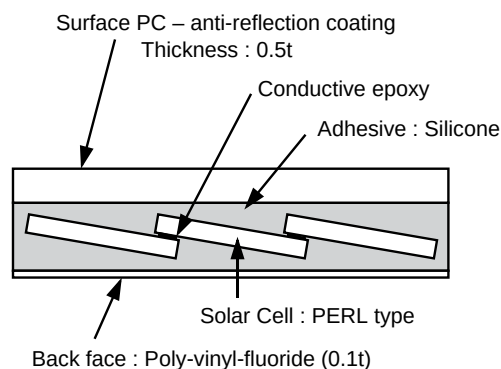


Fig.2 Construction of solar cell module (96Dream)

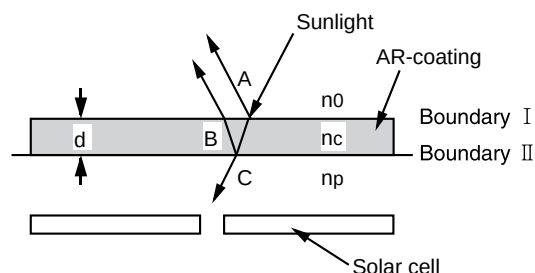


Fig.3 Mechanism of anti-reflection coating

のエネルギーの反射率 R は、

$$R = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

従って、AとBの振幅が等しいとすると、

$$n_c = \sqrt{(n_0 \cdot n_p)}$$

位相を逆にするためには、

$$n_c \cdot d = \lambda / 4$$

になる様にする。

ここで、

R ：反射率

n_0 ：空気の屈折率

n_c ：薄膜の屈折率

n_p ：表面材の屈折率

d ：薄膜の板厚 (mm)

λ ：波長 (mm)

実際には、適当な屈折率の物質がなかったり、入射角や波長により反射率が変わるため、複数の物質(SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 など)を組み合わせることで多層コートにする場合がある。

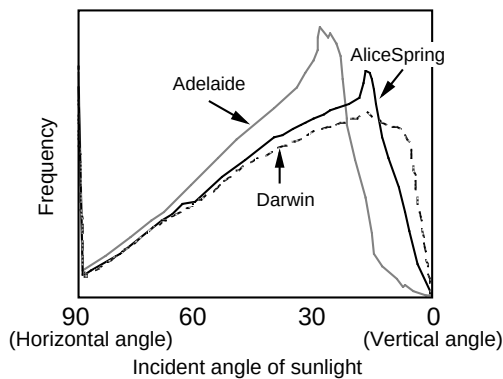


Fig.4 Incident angle frequency

実車に貼り付けられたモジュールには、様々な角度から太陽光が当たる。最適な反射防止膜を設計するために、朝・昼・夕と太陽高度が変わった時の各モジュールでの入射角頻度を求めた。Fig.4に結果を示す。

この結果より、最も頻度が高い角度を中心に透過率が高くなる様に反射防止膜を設計した。

検討材料のうち、透過率の高かった二種類の材料(PC基材のARコート、オレフィン系基材のARコート)の透過率(設計計算値)と93モデルの透過率(実測値)の波長特性をそれぞれ、Fig.5～7に示す。

表面材として要求される特性比較をTable 4に示す。この比較表より上記二種類の材料のよいことが判るが、更に詳細比較を行った。

PC基材は、0.5mmにまで薄くでき、カットなどの加工性も良好である。これに対し、オレフィン系基材では、0.8mmまでしか薄くできず、重くなるのに加え、モジュールカット時にクレージング(細かいクラック)が発生するため、モジュール寸法を大きくする必要がある。このため、オレフィン系基材では、ボディに貼り付ける

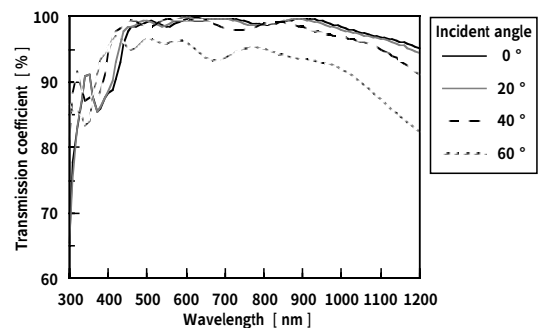


Fig.6 Characteristics of transmission of olefin-AR

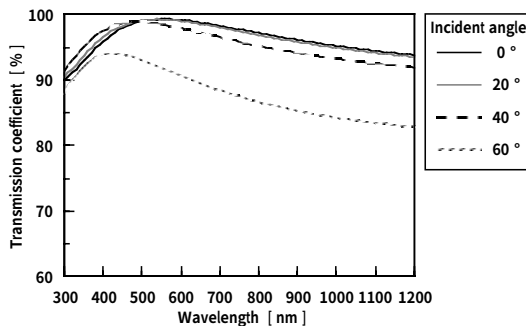


Fig.5 Characteristics of transmission of PC-AR

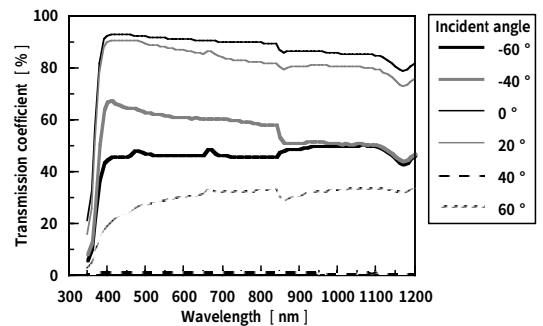


Fig.7 Characteristics of transmission of 93Dream

Table 4 Comparison of surface material

Item	Acryl (93 material)	Acryl AR	Olefin	Olefin AR	PC	PC AR	Sawtooth waveform
Weight Specific gravity(γ) Minimum thickness(mm)	△ 1.20 0.8	△ 1.20 0.8	○ 1.01 0.8	○ 1.01 0.8	○ 1.20 0.5	○ 1.20 0.5	× 1.20 1.0
Transmission Energy loss(%)	○ 5.4	◎ 1.4	○ 5.9	◎ 1.2	△ 9.1	◎ 1.4	○ 7.1
Durability Change of transmission(%)	○ -0.1	○ -0.2	× crack	○ -0.4	○ ±0	○ -0.2	○ -0.1
Impact strength Izod impact (kg·cm/cm)	△ 1.6	△ 1.6	○ 3.0	○ 3.0	◎ 6.0	◎ 6.0	△ notch effect
Thermal expansion Thermal coefficient (cm/cm/°C)	△ 8×10^{-5}	△ 8×10^{-5}	○ 7×10^{-5}	○ 7×10^{-5}	○ 7×10^{-5}	○ 7×10^{-5}	△ 8×10^{-5}
Heat distortion HDT(°C)	△ 90	△ 90	○ 120	○ 120	○ 120	○ 120	△ 90
Evaluation	△	○	×	◎	△	◎	△

◎ : excellent
○ : good
△ : slightly better
× : no good

ことができるソーラセルの枚数が約160枚少なくなり、発電量は減少する。

両者の発電量をシミュレーションで比較すると、PC基材のほうが、約90W多く発電し、これはバランス車速を1 km/h以上、向上させることができる。

上記の検討結果から、表面材にはPC基材のARコートを採用することに決定した。この結果、Fig.8の様に、広い入射角の範囲で高い透過率が得られた。

4. 5. 高密度実装

ソーラカーでは、いかに発電に寄与しない面積を減らすかも、一つの技術課題である。セル間の隙間を低減す

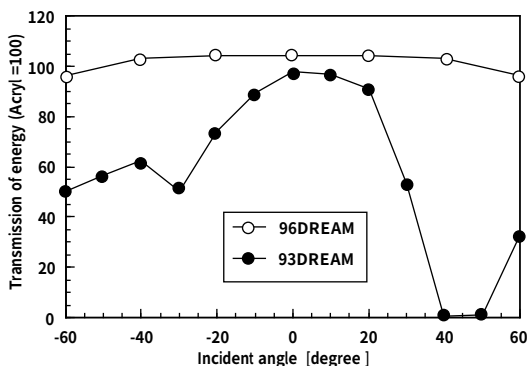


Fig.8 Comparison of transmission energy between 93Dream and 96Dream

る方法として、Fig.2に示す「瓦重ね方式」によるセルの接続を検討した。この方法では重ね方向の隙間がないため単位面積当たりの発電量が増加する。以下に、接続材料の仕様検討結果を述べる。

- (1)リボン半田：通常の半田をリボン状にしたものとフラックスを2枚のセルの間に挟み込み、固定して加熱する方法を検討したが、半田の溶融温度が高いため、冷却後の熱収縮ひずみが大きく、安定した精度での接続ができない。
- (2)クリーム半田：半田の微粒子をペースト(半田の付きをよくするもの)に練り込んだもので、半田の密着性はよいが、ペーストがセルの表面を汚染しやすい。
- (3)導電エポキシ樹脂：エポキシ樹脂に銀などの導電フィラーを練り込んだもので、硬化温度が低い利点があり、安定した精度での接続が可能である。

以上を比較検討した結果、接続抵抗についても半田と遜色なく、作業性に優れた導電エポキシ樹脂を採用した。

「瓦重ね方式」を採用した結果、約50cm角のモジュールでの実装効率は、93モデルの98.4%から、96モデルでは98.6%に向上した。

5. 成形プロセス

ホンダ独自のモジュールを製作するため、作業性・生産性を考慮し、以下に示すプロセスでモジュールの製作を行った。

- (1)Fig.9に示すテンプレートにソーラセルを並べて接続する

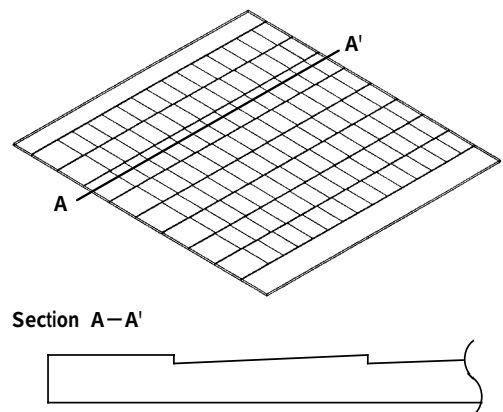


Fig.9 Template

- (2)裏面材、接続したソーラセルをセットする
- (3)真空中でシリコンを流し込み、脱泡をする
- (4)表面材をセットする
- (5)加熱しシリコンを硬化する
- (6)冷却後、脱型してトリミングする

プロセスを確立する上で、特に検討を行った課題を述べる。

(1)接続方法

ソーラセルを接続する時に、ソーラセルを精度よく並べる必要がある。ソーラセルを並べて加熱処理をするために、Fig.9に示すテンプレートをを用いたが、その材質として、熱伝導率がよく、熱ひずみが少ないことが要求され、加工性にも優れるカーボンを採用した。

また、接続材料である導電エポキシ樹脂の塗布方法については、注射針やピペットなども検討したが、塗布量を一定にすることや、塗布位置の精度や作業効率を上げるため、スクリーン印刷法を導入した。Fig.10に実施例を示す。

(2)シリコン硬化温度

製作段階で、シリコンの加熱硬化時の温度条件により、冷却後の温度差のため表面材とソーラセルの収縮差ができ、瓦重ねしたソーラセルの接続部に応力集中が発生し、接続部が剥離し、断線または接続抵抗の増大を招くことが判明した。

そこで、シリコンの硬化温度を見直し、ソーラカーがさらされる最低温度と考えられる空輸時(0

Table 5 Relation between molding condition and stress concentration

Cure temp. Item	85°C	60°C
Dimensional change (mm)	1.7	0.9
Stress (MPa)	8.0	4.3
Cure time (hr)	1.5	3

Table 6 Efficiency of solar cell module

	93Dream	96Dream*
Cell efficiency(%)	21.2	22.57
Module efficiency(%)	20.3	21.83
Module loss(%)	4.2	3.3

*3cells for efficiency measurement

℃)の発生応力が、ソーラセル接続部の導電エポキシ樹脂の許容応力(5.2MPa)以下になる様に温度条件を設定しなければならない。Table 5より、加熱時間がのびて生産性は落ちるが、発生応力の低い、60℃に硬化温度を設定した。

6. まとめ

各目標に対し結果は以下ようになった。

(1)エネルギー損失

ソーラセル単体とモジュールの発電効率の測定結果より、モジュール化によるエネルギー損失はTable 6に示す様に3.3%であり、目標を達成した。

(2)高密度実装

貼り付け効率は、98.6%で93モデルを上回り、目標を達成した。

(3)軽量化

93モデルと比較すると、モジュールの貼り付け面積が増えているため、モジュールの総重量は約3kg増えているが、1m²当たりでは、0.5kg(14%)の軽量化を達成した。

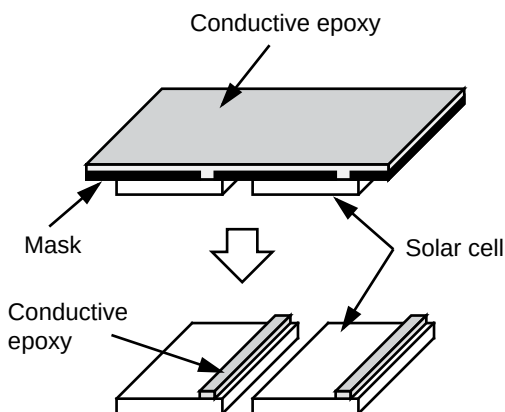


Fig.10 Screen printing

参考文献

- 1) 岩田 他、「ソーラー電池動力自動車1993」、
HONDA R&D Technical Review, Vol.6 1994, pp.1-
16

■著 者■

中 村 忠 久



荒 晴 哉



山 田 孝 行