

小型ソーラーカーの開発およびその性能

Development of a Half Sized Solar-Car and Its Performance

木村 英樹^{*1}

Hideki KIMURA

梶 井 基 之^{*4}

Motoyuki MOMII

池 上 敦 哉^{*2}

Atsuya IKEGAMI

木 村 聡 海^{*5}

Satomi KIMURA

堺 一 佐 武^{*3}

Isamu SAKAI

Abstract

In order to realize the cost down, a solar car of half conventional size was manufactured originally. The weight and the aero dynamic drag force of the body were reduced to supplement the solar electric power generation decreased by the miniaturization. On the 1999 World Solar-car Challenge (WSC '99) in Australia, this half sized solar-car attained the equivalent performance compared with the full sized one.

Key Words: Small sized solar car, Energy efficiency, Low cost, Light weight body, World Solar-car Challenge

1. はじめに

オーストラリア大陸のダーウィンからアデレードまでの約 3000km のコースを縦断するワールド・ソーラーカー・チャレンジ(World Solar-car Challenge, 以下 WSC と略記する)が 1999 年の 10 月に開催された。この WSC は 1987 年から始まり、3 年に一度開かれ、今回で第 5 回目の大会となる。WSC は 11 カ国のチームが参加する国際的な大会であるとともに、オーストラリア大陸の中央がほとんどが砂漠地帯であることから、世界で最も過酷なソーラーカーレースである¹⁻³⁾。1987 年、ガリウム砒素太陽電池を搭載したアメリカの GM サンレーサーが優勝し、1990 年には空力性能に優れたスイスの Biel 工科大が優勝した。また、1993 年と 1996 年には日本のホンダが連続優勝を果たしている。1999 年には Aurora がオーストラリアのチームとして初めて優勝した³⁾。これらの車体はいずれも宇宙用クラスの高変換効率太陽電池を搭載しており、その開発コストは莫大であると推測される。したがって現時点では、ソーラーカーの実用化は不可能に近く、太陽電池を補助的に使用する形態が有望であると考えられる⁴⁾。

これに対して我々は、少しでも現実的なソーラーカーを実現するために、一般的な競技用の半分の大きさで、コストをできるだけ抑えながら、性能を犠牲にしない新しいタイプのソーラーカーを開発することが必要であると考えた。そこで、小型軽量化とともに空気抵抗、転がり抵抗等を追求したソーラーカーを設計製作し、実際に WSC の場を借りてその性能を実証したので報告する。

2. 小型ソーラーカーの設計製作

2.1 設計方針

WSC, ワールド・ソーラーカー・ラリー・イン・アキタ(WSR), ドリームカップソーラーカーレース鈴鹿などの主要な大会において、ソーラーカーの大きさは、全長 6m 以内、全幅 2m 以内、全高 1m 以上 1.6m 以内と定められている。また、太陽電池アレイの面積は車体サイズの中に長さ 4.44m 以内で上方投影面積 8m² (2 人乗は 12m²) 以内とされている。したがって、ほとんどのソーラーカーは、許されたサイズの上限近くまで車体を大きくすることで、より多くの太陽エネルギー

*1 会員 東海大学工学部電子工学科(〒259-1292 平塚市北金目 1117)

*2 ヤマハ発動機(株)モーターサイクル事業本部

*3 (株)PFU

*4 (株)本田技術研究所

*5 理化学研究所 GSC

(原稿受付 平成 12 年 6 月 16 日)

Department of Electronics, School of Engineering, Tokai University

Motorcycle Operations, YAMAHA MOTOR CO.,LTD

PFU Ltd.

HONDA R&D CO.,LTD

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN) GSC

を得ようとしている．これに対して，我々は製造や輸送に関するコストを低減するために，全長 3.21m，全幅 1.30m と従来に比べ格段に小さいサイズのソーラーカーを設計することにした．

一般に，無風状態の平地を走行する車の走行パワーは次式で表される²⁾．

$$P = (\mu m g v + C_d A \rho v^3 / 2) / (\eta_e \eta_m)$$

ここで

P: 走行パワー(W)

μ : 転がり抵抗係数(0.005 推定値)

m: 車体質量(178.5kg ドライバーを含む)

g: 重力加速度(9.8m/s²)

v: 速度(m/s)

C_d : 空気抵抗係数(0.23 推定値)

A: 前方投影面積(0.57m²)

ρ : 空気密度(1.203kg/m³)

η_e : 電気効率(最高効率 86%)

η_m : 機械効率(97%)

である．

ソーラーカーの小型化に際しては，太陽電池アレイ出力の低下が避けられないため，上式に示した走行パワーの低減が重要な課題となる⁵⁾．走行パワーの低減には，転がり抵抗と空気抵抗の両方を減少させることが必要となる．そこで，車重(m)の軽量化を行い，ソーラーカー専用低転がり抵抗係数(μ)タイヤを採用し，前面投影面積(A)を 0.57m² まで減少させながら，空気抵抗係数(C_d)の増加を抑えるなどを念頭に置き車体設

計を行った．設計した車体の図面を図 1 に，車体の仕様を表 1 に，そして外観を図 2 に示す．

表 1 製作した小型ソーラーカーの主な仕様

| | |
|--------------|---------------------------|
| 全長×全幅×全高 | 3210 × 1300 × 1000mm |
| トレッド | 900mm |
| ホイールベース | 1553mm |
| 車重(二次電池を含む) | 98.5kg |
| 車輪配置 | 前 2 輪 後 1 輪 |
| 車体構造 | カーボンモノコック |
| 太陽電池種類 | 単結晶シリコン |
| 太陽電池 | SHARP NT3432 13 枚相当 |
| 太陽電池アレイ出力 | 520W +Add-on panel 220W |
| MPPT | マイウェイ技研 PV-MAX97A |
| 二次電池種類 | Sony US17670 (Li-ion) |
| 二次電池電圧 | 3.6V × 14 直列= 50.4V |
| 二次電池電流容量 | 1.1Ah × 48 並列=52.8Ah |
| 二次電池エネルギー容量 | 2660Wh |
| 二次電池重量 | 24.19kg |
| 二次電池エネルギー密度 | 110Wh/kg |
| モーター | HONDA DDW4030 |
| 駆動方式 | 後輪 チェーン駆動 |
| サスペンション(前/後) | ダブルウィッシュボーン(前)/スイングアーム(後) |
| タイヤ | Michelin Radial 65/80-16 |
| ホイール | カーボンディスク |

2.2 車体各部の特徴

車体の骨格となるバスタブ型モノコックフレームには，バルサ材をコア材としたカーボン繊維強化プラスチック(CFRP)のサンドイッチパネルを使用し，副構造部材を極力廃したシンプルなものとした．これはボデ

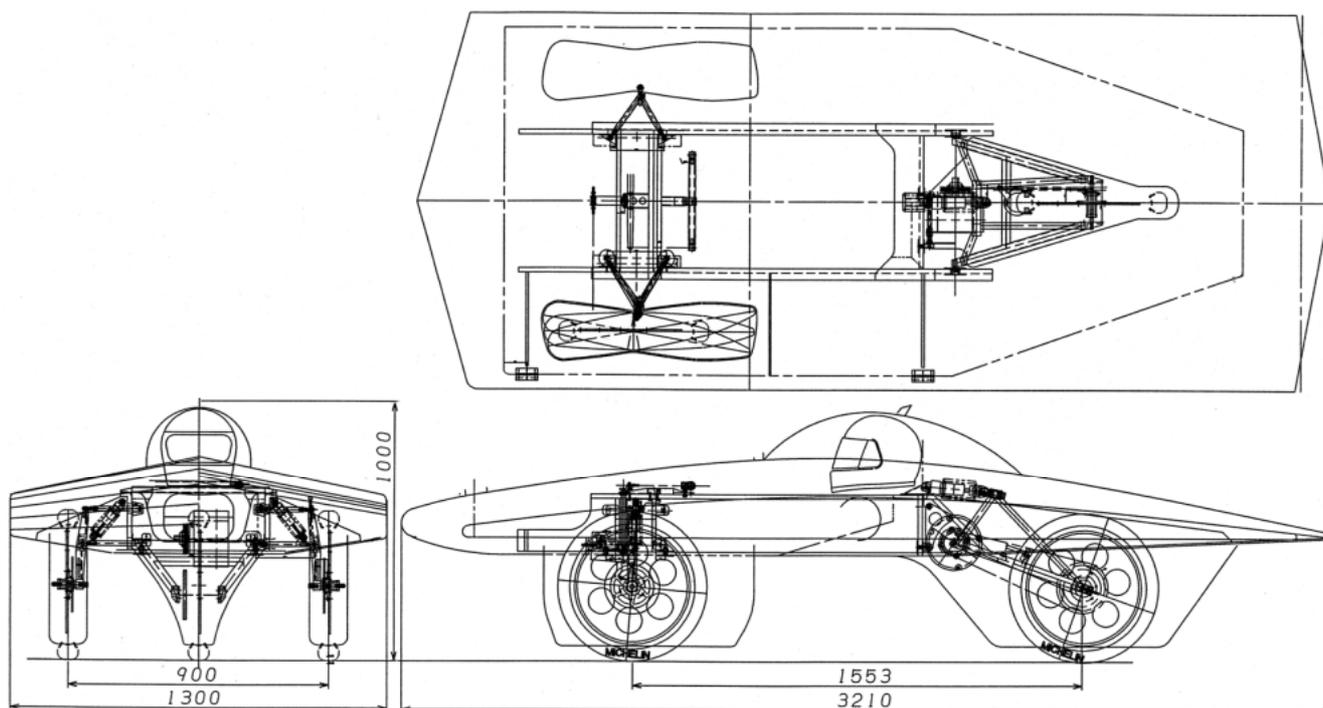


図 1 設計した小型ソーラーカーの構造図



図2 小型ソーラーカーの外観

ィー軽量化と低コスト化の実現に大きく貢献した。しかし、1998年度のWSRにおいてドライバーから車体のねじり剛性不足に起因する直進安定性および外乱収束性の不足が指摘されていた。そこで、製作したバスタブ型構造について有限要素法を用いたソフトウェア(MSC.Nastran)による解析を行ない、フロントサスペンション間のモノコック上部開口部に補強部材を追加することで、フロント-リア間の捻り剛性を約1.4倍に向上できることを確認した後、改良作業を実施した。解析モデルの一例を図3に示す。その結果、横風に対しても十分な直進安定性を得ることができた。また、キャノピーは2mm厚のポリカーボネート板を加熱後バキューム加工することで製作し、耐衝撃性を向上させるとともに、歪みの少ない視界を確保した。

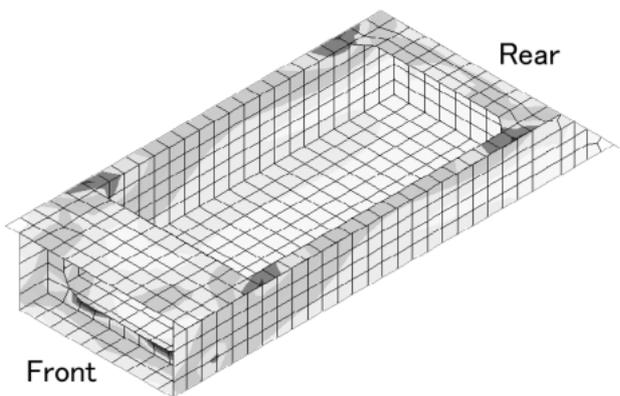


図3 バスタブ構造の強度解析例

太陽電池アレイには、シャープ製太陽電池モジュールNT3432(15.8V × 2.53A=40W)を13枚相当使用した。アレイ総出力は520W、モジュール変換効率は16%である。カウルの曲率によって生じる光強度の不均一性を改善するために、太陽電池アレイを6系統に分割し、

昇圧型MPPT(マイウェイ技研製PV-MAX97A)を各系統に配置して二次電池に接続した。一方、走行時間外の朝夕には、ソーラーカーの太陽電池アレイを含む投影面積が4.44m(2人乗は6m) × 2.56mの枠内に入れば、レギュレーションによってアドオンパネルの使用が認められている。このアドオンパネルとは、昼間(8:00 ~ 17:00)の走行中はソーラーカー内部に格納し、走行時間外の朝夕に展開して使用する携行パネルのことである。検討の結果、今回使用した軽量太陽電池モジュール(約2kg)であれば、重量増加による走行エネルギーの悪化は無視できるほど小さいことが分かったので、この方式を採用することにした。充電時の様子を図4に示す。このアドオンパネルを併用することにより朝夕の発電量は約1.4倍に増加する。このようなアドオンパネルを携行する方式は、大面積の太陽電池アレイによる空気抵抗の増加を防ぐことができるため、実用的なソーラーカーを考える上で有効な手段である。なお、充電時には温度上昇による変換効率低下を減らすために、太陽電池アレイに水を直接散布して冷却を行った。

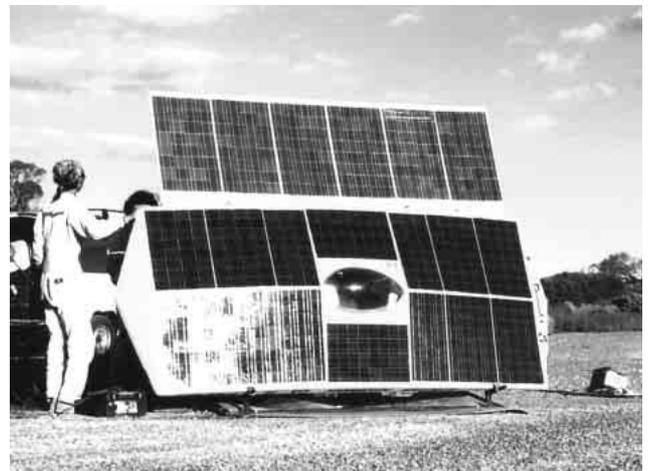


図4 アドオンパネルを併用した充電

二次電池には重量エネルギー密度が110Wh/kgと大きいリチウムイオン電池(ソニー製US17670)を672本使用した。リチウムイオン電池は、直列接続した際に電圧バラツキが発生するとともに、使用電圧範囲を越えた充電に弱いといった性質があるので、その取り扱いには注意が必要となる。そこで、電圧上限値に達するとMPPTを停止させ太陽電池アレイからの充電を停止させる保護回路を設置するとともに、各セルの電圧バラツキを測定しながら慎重に使用することにした。7日間に及んだ競技期間中、電圧バラツキを計測したが、0.03V以上の電圧バラツキは発生しなかった。こ

れは、もともとリーク電流が少ないというリチウムイオン電池の性質と、量産品であることから電池容量が揃っていたこと、さらに48並列にしたことで電池特性の平均化が行われたことによると考えている。重量エネルギー密度が高いリチウムイオン電池は、現段階では競技用ソーラーカーにとって最適な電池の一つであるといえる。なお、レギュレーションではリチウムイオン電池を40kgまで搭載することができるが、小型ソーラーカーの消費電力が小さいこと、また重量増加を抑える目的から、朝夕の充電に耐えられ、悪天候に対応できる最低限の24.19kgに留めた。

モーターは本田技研工業製の運搬機器用DCブラシレスモーターDDW4030(A-Type)を使用し、ギヤ比を細かく設定できるようにするため、ギヤとチェーンによる駆動方式を採った。ホイールは重量増加を抑えるために、前2輪、後1輪の3輪とし、サスペンションは前輪がダブルウィッシュボーン、後輪がスイングアームの構造を採った。ショックアブソーバーには自転車(MTB)用を元にした特注品(カヤバ工業製)を使用した。タイヤには、低転がり抵抗係数を誇るミシュラン製ソーラーカー用ラジアルタイヤを使用した。また、剛性を高めるためにカーボンディスクとアルミ製リムによる2ピース構造のホイールを製作した。回転するホイールが発生するウィンドミル効果によって空気の流れが乱され、空気抵抗が増加するので、タイヤの外側には図1,2に示したように整流スパッツ(ホイールカバー)を全輪に装着した。

さらに、少ないエネルギーを有効に活用するため、多機能マイコン(日立製H8/3048F)による計測システムおよびサポートカー内でのパソコンによる走行シミュレーションによって、ソーラーカーの走行支援を行った。なお、一台分の原材料費が約280万円となり、ソーラーカーとしては非常に低コストで製作することができた。

3. レースを通じて得られた結果

3.1 安全性およびスタビリティテスト

車検会場では車体の大きさや重量、太陽電池の種類と面積、補器類や視界などの安全性、搭載電池の種類とその重量などがきめ細かくチェックされた。車検の結果、オーストラリアの公道(スチュアート・ハイウェイ)を走行できるナンバープレートが交付された。また、公道では100km/hを越える3両連結トラック(ロードトレイン)とのすれ違いがあるため、安全性を確

認するためにスタビリティテストが行われた。このテストで車両の安定性が確認されたとともに、本ソーラーカーの最高速度62.61km/hが計測された。

3.2 レース中の走行速度および各電力量

図5,6に7日間に及んだレースにおける太陽電池アレイ発電電力、モーター消費電力、車速の推移、速度に対する消費電力、バッテリー残量およびバッテリー電圧を示す。

アレイ発電電力のカーブから、競技期間中の天候は概ね好天であったことがわかる。これは、走行中に雨となる日があった1996年よりも比較的よい天候であったといえる。また、図4に示したように朝夕にアドオンパネルを展開し、メインアレイとともに太陽に垂直に向けることで発電量が大きくなっていることがわかる。アドオンパネルのみの発電量を灰色線で示したが、この時間帯では総発電電力の3割を負担していた。さらに、朝の発電時間帯に発電量が右下がりになっている部分があるが、これはリチウムイオン電池の耐圧を越えて電圧が印加されないよう、意図的に太陽電池アレイに影を落とすなどで発電量を落とすためである。一方、日中のピーク発電量が日増しに大きくなっているが、赤道に近いダーウィンからアデレードへと南下していくに従って気温が減少し、温度上昇による太陽電池変換効率の悪化が少なくなったことによる。また、赤道から離れた大気中の水分が減少したことで、太陽光の透過率が增大したことも影響していると考えている。

モーター消費電力カーブを見ると、1日目は変動が大きい。これはコース上にアップダウンがきつい区間が多かったことに加え、図6に示したように、速度を一定に保つようにコントロールしたことに起因している。

速度の推移を見ると各日とも2回停車していることが分かる。これは30分間の停車が義務付けられたメディアストップ(M印)と、ドライバー交代(D印)を行ったことを示している。

速度とモーター消費電力の関係を示したグラフにおいて、測点が右下の方向へ並ぶ傾向が見られた。これは、車速が増加しDCモーターが高速で回転すると、ステーターで発生する逆起電圧が高くなり、電流が流れにくくなるからである。そのため、スロットル一定の条件下で坂の影響などで速度が変化すると、モーター特性に従って測点が並ぶのである。したがって、1日目のようにスロットル調整が頻繁に行われると、測点のバラツキが大きくなる。また、測点が筋状に現れたのは、強い横風による影響を減らすために巡航速度

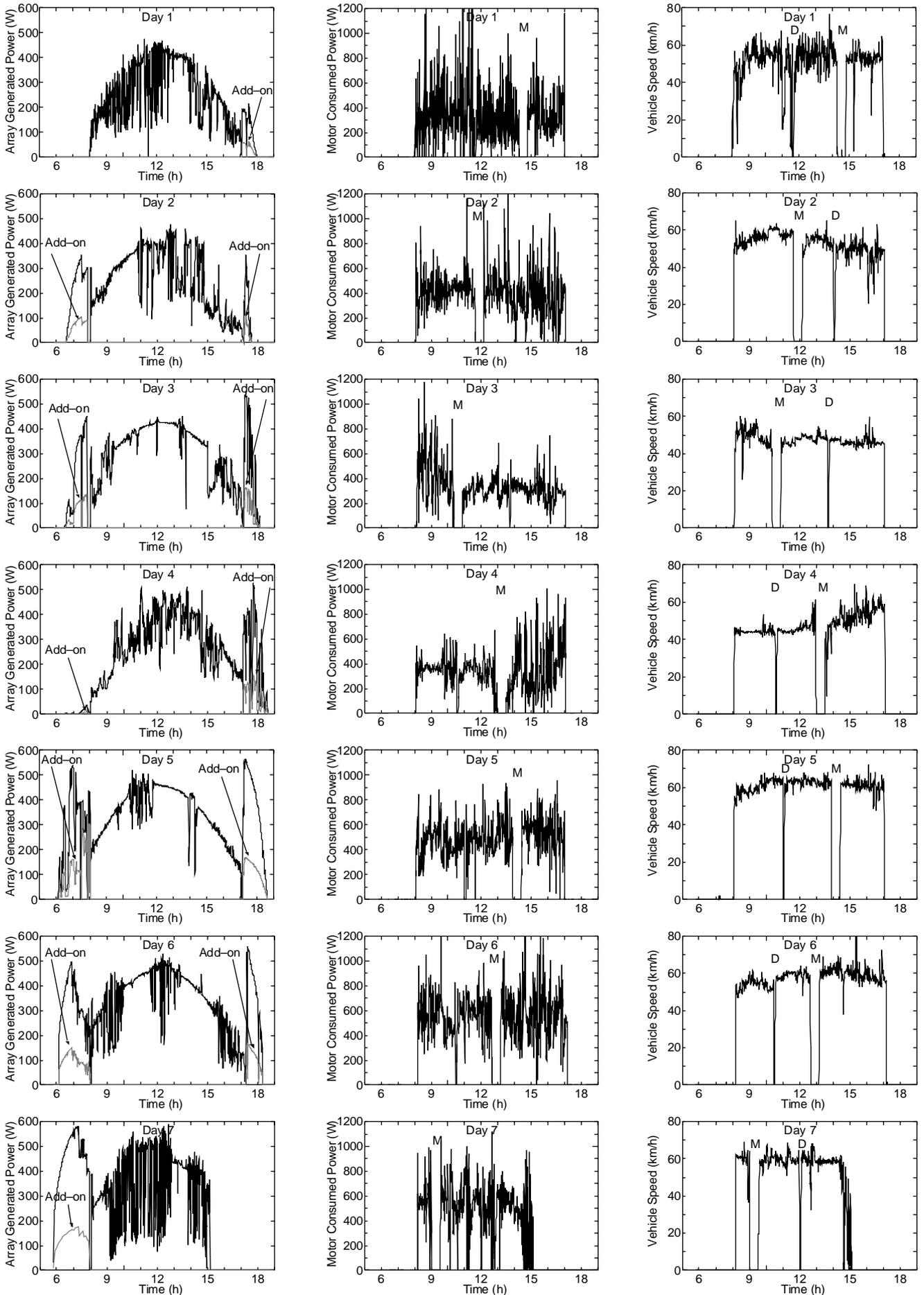


図5 各日の時刻に対する太陽電池アレイ発電電力，モーター消費電力，速度の推移

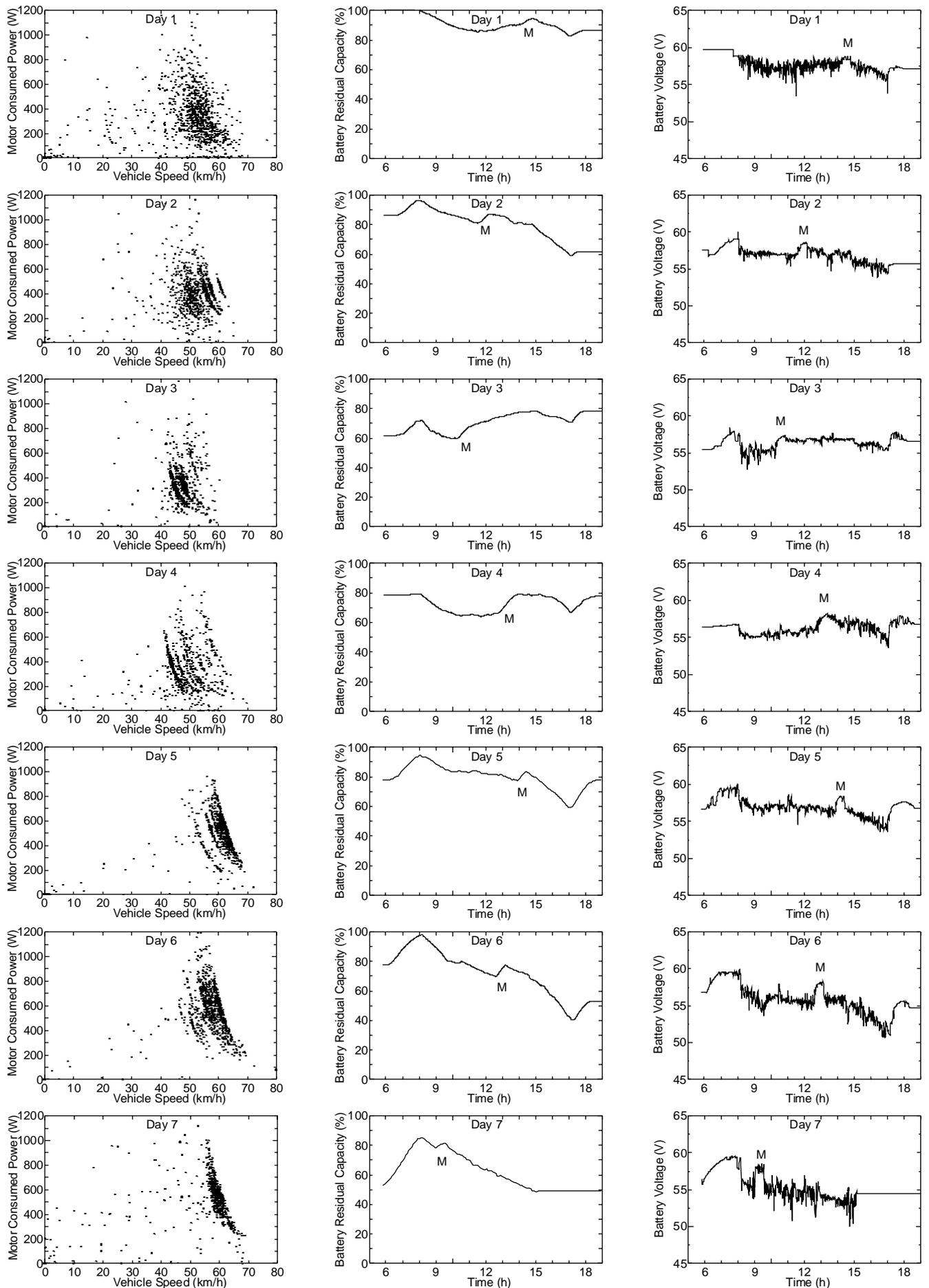


図6 各日の速度に対するモーター消費電力および時刻に対するバッテリー残量，電圧の推移

を落としたり、バッテリー残量予測のずれを補正するためにスロットル開度を数パターンで変化させたことを意味している。したがって、5～7日目に測点が集中しているのは、PWM制御による損失が出ないようにギヤ比を調整し、全開走行を行った時間がほとんどであったことに対応している。

バッテリー残量については、悪天候に備えて残量を多めに確保しながら走行したことが分かる。また、グラフ中に残量が増加する部分があるが、これはメディアストップに停車(M印)しているため、モーター消費電力が無いためである。3日目午後から4日目にかけて天候が悪化するという予報をメディアストップで得たため、3日目11時以降については特にモーター消費電力を抑えながら走行した。このため残量は増加傾向にある。最終日については登坂能力を確保するギアセッティングにしたことで、バッテリーを使い切ることができなかった。

バッテリー電圧の変化からは、リチウムイオン電池が電圧変動の大きい電池であることが確認できる。残量と比較すると同様なカーブを示し、電圧からバッテリー残量を見積もることが比較的容易であることがわかる。

次に、図5の発電カーブから得られる各日の天候、発電電力量、およびモーター消費電力から得られる消費電力量を表2に示す。また、速度のグラフから得られる平均速度と走行距離についてを表3に示す。表3に示した平均速度はメディアストップにおける30分間の停車やドライバー交代の時間を含んでいるため、実際の平均巡航速度は7%程度速い。したがって、全日程における平均速度は49.7km/hであったが、メディアストップ等の停車時間を除いた平均速度は53.2km/hとなる。この平均速度の値は快適性などの課題を除けば、十分実用に耐えられるものであるといえる。

以上の走行データを総合的に解析すると、製作された車体の中の値で不確定であった空気抵抗係数(C_d)値および転がり抵抗係数(μ)値をシミュレーションによって求めることができる。シミュレーションによる走行パワーを図7に示す。計算の結果、 C_d 値および μ 値はそれぞれ0.20, 0.0045程度となりこれらの値は、ソーラーカーの形状およびオーストラリアの舗装面の状態などを考えると妥当なものであるといえる。

3.3 小型ソーラーカーによる完走のインパクト

WSCに出場した主要な車両28台のデータをもとに、太陽電池アレイ面積に対する車重の分布をまとめたものを図8に示す³⁾。図の右下ほど太陽光による発電量

表2 各日の天候、発電電力量および消費電力量

| 日数 | 天候 | 発電電力量(Wh) | 消費電力量(Wh) |
|-----|------|-----------|-----------|
| 1 | 晴時々曇 | 2518 | 2909 |
| 2 | 晴後曇 | 2321 | 3400 |
| 3 | 快晴 | 3183 | 2823 |
| 4 | 晴時々曇 | 2901 | 2894 |
| 5 | 快晴 | 4194 | 4142 |
| 6 | 快晴 | 4067 | 4760 |
| 7 | 晴時々曇 | 3190 | 3144 |
| 全日程 | - | 合計 22374 | 合計 24072 |

表3 各日の平均速度および走行距離

| 日数 | 平均速度(km/h) | 走行距離(km) |
|-----|------------|----------|
| 1 | 48.0 | 432 |
| 2 | 49.3 | 444 |
| 3 | 44.1 | 397 |
| 4 | 44.5 | 401 |
| 5 | 56.8 | 511 |
| 6 | 54.0 | 486 |
| 7 | 51.4 | 329 |
| 全日程 | 49.7 | 合計 3000 |

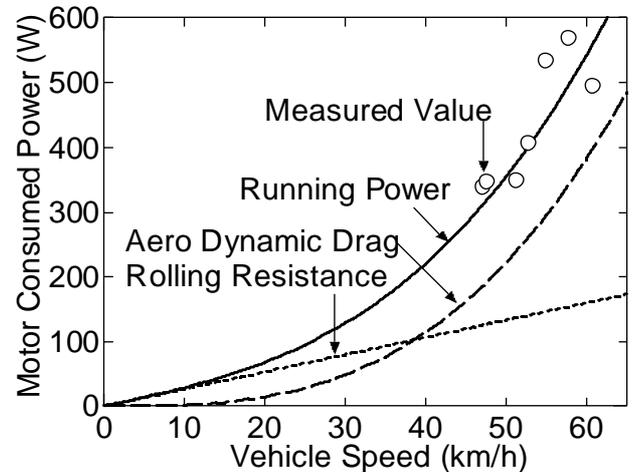


図7 速度に対する走行パワーシミュレーション

が増え軽量となることから、基本的には優れた走行性能となる傾向があると考えられる。発電量を少しでも多く得るため、太陽電池アレイ面積は1人乗りの上限である8m²付近に集中し、一部の2人乗りは12m²近くに分布している。車重は167～469kgの範囲に存在し、平均は244kgであった。これに対して我々が製作したソーラーカー Junkyard は、太陽電池モジュール面積の合計が3.25m²であり、他と比べて半分以下であることがわかる⁶⁻⁹⁾。また車重についても98.5kgと非常に軽量であり、これも平均的なソーラーカーの半分以下とな

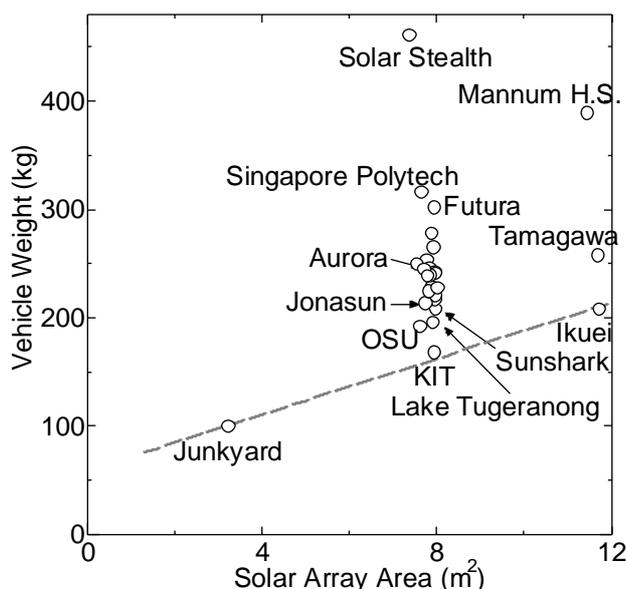


図8 太陽電池アレイ面積に対する車両重量の分布

っていることがわかる。ただし、ドライバーの体重はバラストによって調整され80kg一定であるので、小型のソーラーカーが不利であることに変わりない。しかしながら、このような小型ソーラーカーであっても、2倍近い大きさのものとほぼ同等に走行できることを実際に証明できた。

当初は9日間以内の完走を目標としていたが、晴天に恵まれ、パンクなどのアクシデントも全く無かったことから7日間(60時間24分、メディアストップを除くと56時間54分)という自己最高に近い結果を出すことができた。なお、レース結果がプライベートクラス3位(総合40台中17位)となったことから、本研究で開発した小型ソーラーカーは従来サイズのものと比較して、十分な走行性能を低コストで達成することができたといえる。

4. まとめ

CFRPによるモノコックボディーやディスクホイール、エネルギー密度の高いリチウムイオン電池を採用するなど、小型で軽量のソーラーカーを実現した。また、小型化による発電不足を改善する一つの手法としてアドオンパネルを採用することで発電量を補うことができた。これは、ソーラーカーの実用化を考える際の重要な指針となった。小型化にともなって、軽量化や前面投影面積を減少などを積極的に進めることで、フルサイズ車並の性能を実現できた。製作した小

型ソーラーカーでWSC '99に参加し、7日間で完走することができた。これは、WSC 3000kmのコースを過去に完走したソーラーカーとしては最小のサイズであった。

謝辞 使用したエネルギーが最も少ないソーラーカーであることから、温室効果ガスの削減に貢献する環境技術であるとしてオーストラリア政府グリーンハウスオフィスより環境賞を、またオーストラリア・ノーザンテリトリー州立大学よりチャレンジ精神に対してKatherine Clunies Ross氏賞を授与していただき感謝します。資金的な援助をいただいた(株)寅壺、(株)なかよしに感謝します。また、技術的な支援をいただいた日本ミシュランタイヤ(株)、カヤバ工業(株)、マイウェイ技研(株)、日本精工(株)、古河電池(株)に感謝します。性能測定の間を提供していただいたWSC、WSR および JISC 大会関係者各位および車体輸送に携わったスミトランス・ジャパン(株)に感謝します。最後に、チーム Junkyard の関係者各位に感謝します。

参考文献

- (1) 木村英樹: ソーラーカー、夢、未来-明日を拓く技術に挑む、技術と経済 No. 385 (1999) 44.
- (2) D. M. Roche, A. E. T. Schinchel, J. W. V. Storey, C. P. Humphris and M. R. Guelden, "Speed of Light: The 1996 World Solar Challenge", Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales (1997) 175.
- (3) 沼崎英夫: 1999 World Solar Challenge, Solar Systems No. 79 (1999) 45.
- (4) 齋藤静二, 藤中正治, 環境負荷低減を目的とした太陽電池活用法の研究, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1998) 313.
- (5) 齋藤武雄, 星朗, 安藤大吾, 蔵田和義, マイレッジマラソン ソーラービークルの最適設計とプロトタイプ車への応用, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1998) 321.
- (6) 木村英樹, 星野博司, 松前義昭, 高本慶二, 平岡克己, 内田裕久, 渡辺真一郎, 高橋昌宏: 電気二重層キャパシタ, ニッケル水素電池および低転がり抵抗タイヤによるソーラーカーのエネルギー効率改善, 太陽エネルギー Vol. 25 (1999) No. 2, 45.
- (7) 豊嶋義隆, 藤田久和, 安藤友二, 松浦謙, 金山幸雄, 競技用ソーラーカーの走行性能, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1999) 265.
- (8) 鈴木誠, 鹿野文久, 「ソーラーカーレース IN TOCHIGI」でのソーラーカーのエネルギー収支, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1999) 261.
- (9) 佐々木幹夫, 藤田茂隆, 加賀拓也, 目修三, ソーラーカーの操舵系統調整誤差による抵抗, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1998) 325.