

ソーラーカーの設計製作

～製作したソーラーカーの走行性能特性～

山崎 保輔・宮腰 朝幸・渡部 竜也・井上 猛
後藤 智・小松 靖・高階 拓

A Solar Car Set up

Yasusuke YAMAZAKI, Tomoyuki MIYAKOSHI, Tatsuya WATANABE, Takeru INOUE
Satoshi GOTO, Yasushi KOMATU, Taku TAKASHINA

(2002年11月29日受理)

For the solar car race held in Ogata village (Akita prefecture), a solar car belonging to halfsize class (H-2) was designed with drawing for three months (from April~June 2001). Assembly work took us nearly twelve months and therefore our team could only just have a race. Traveling performance was calculated previously from the various traveling factors on the assumption. For example the factors are $C_d=0.5$, $\mu_r=1/100$ and so on. As a calculation result the speed expected was 27km/h.

After the race, rolling and air resistance were measured by means of pulling the solar car at each speed. From these resistances $C_d=0.6$, $\mu_r=1/113$ were obtained. In addition the resistances mentioned above were caught by spring scale.

1. 緒言

本研究では秋田県大潟村で開催される第4回全日本学生ソーラーカーチャンピオンシップ JISC (2002) 参加を企画、ハーフサイズカテゴリーストッククラス H-2 部門 (太陽電池発電量480Watt 以下, 制御弁式鉛バッテリー 45kg 以下) のレギュレーションに基づき, 設計製作を進めた。

平坦路が大部分を占める大潟村ラリーコースに於いて, ソーラーカー車両の走行性能を支配する主因子は空気抵抗並びに転がり抵抗があげられ, これら2因子に対する各々の係数を仮定, 設計計算等を進めた。また, 本設計製作では特に後者の転がり抵抗減に留意し, 一部を除きほとんど全ての部品をネジ結合とし, 組立精度向上を念頭に置いた。

ラリー参加後, 再びラリーコースで牽引法により前述の転がり抵抗, 空気抵抗測定試験を実施, 設計時の仮定値と比較し検討を加えた。

尚, 本ソーラーカーは走行動力のほとんどを太陽電池から取得しようとする試みから, 鉛バッテリー 10kg 程度を搭載した。

想定した車両概形を図1に示す。

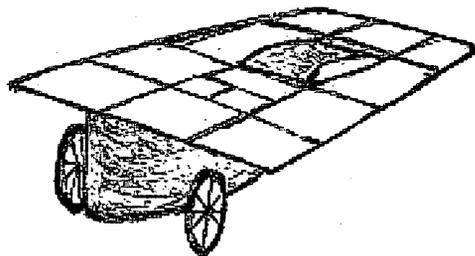


図1 車両概形

2. 設計ならびに製作したソーラーカーについて

本研究で設計する車両が太陽電池とバッテリーを費やし, どの程度の速度をラリー走行で維持出来るのか, 各仕様を仮定し算定を行い, 車両設計の目安とした。

2-1 予想駆動動力の算定 (モータ選定を含む)

本ラリーでの走行は午前8時~午後4時頃までの約8時間である。この間の日射量として、理化年表に記載されている秋田の月平均日射量(7月末頃) = 17.3 MJ/m²を本算定に用いた。

走行時間 = 8時間 = 28800秒とし、単位面積、単位時間当たりの日射量は

$$17.3 \times 10^6 / 28800 = 600 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \\ = 600 \text{ W/m}^2$$

となる。また、

太陽電池1枚の面積 = 0.332m²

太陽電池の枚数 = 10.44枚

太陽電池の効率 = 13.5%

であるので太陽電池による取得電力は

$$600 \times 10.44 \times 0.332 \times 0.135 = 281 \text{ Watt}$$

となり、これにバッテリー分を20 Wattとして加えると301 Wattとなる。

次に、太陽電池の取得電力から駆動動力までの損失を考える。以下に各システムの効率を示す。

ピークトラッカ (MPPT) = 90~95%

バッテリー = 95%

モータ・ドライバ = 95%

モータ = 75~85%

変速伝達装置 = 95%

これらの損失を考慮し、各システムが高効率で稼動したとき駆動動力は次のようになる。

$$0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.85 \times 0.95 \times 301 = 208 \text{ W}$$

また、低効率で稼動したときは

$$0.90 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.75 \times 0.95 \times 301 = 174 \text{ W}$$

となる。これより予想駆動動力は単純平均して191 Wattである。

モータ選定のために取得電力からモータまでの損失を考え、高効率時のモータへの入力電力を求めると

$$0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 301 = 258 \text{ Watt}$$

となる。よってやや余裕を持たせる意味も含め定格出力が300 Wattのモータを選定する。

2-2 予想平均速度の算定 (各値を以下に設定)

L_r: 予想駆動動力 = 191 W

m_d: ドライバー質量 = 80kg

A: 前面投影面積 = 0.5m²

M: 総質量 = 180kg

ρ: 空気密度 = 1.23kg/m³

μ_r: 転がり抵抗係数 = 1/100

g: 重力加速度 = 9.8 m/s²

C_d: 形状抵抗係数 = 0.5

m_r: 車両質量 = 100kg

V: 走行速度 [m/s] = 0~35[km/h] = 0~9.7[m/s]以上を用いて各抵抗力を算出し予想平均速度を求める。

転がり抵抗力 R_r = M × g × μ_r

$$= 180 \times 9.8 \times 1/100$$

$$= 17.64 \text{ [N]}$$

空気抵抗力 R_a = C_d × A × V² × ρ / 2

$$= 0.5 \times 0.5 \times V^2 \times 1.23 / 2$$

$$= 0.154V^2 \text{ [N]}$$

ここで、両抵抗の和である全抵抗 R[N]と速度 V[m/s]の積により、駆動動力 L[W]を求める。

$$L = (17.64 + 0.154V^2) \times V$$

$$= 17.64V + 0.154V^3$$

上式より、縦軸を駆動動力 L[W]、横軸を速度 V[km/h]とした線図(図2)を作成し、予想駆動動力(191Watt)に対応する平均速度を予想した結果、27km/h程度となった。

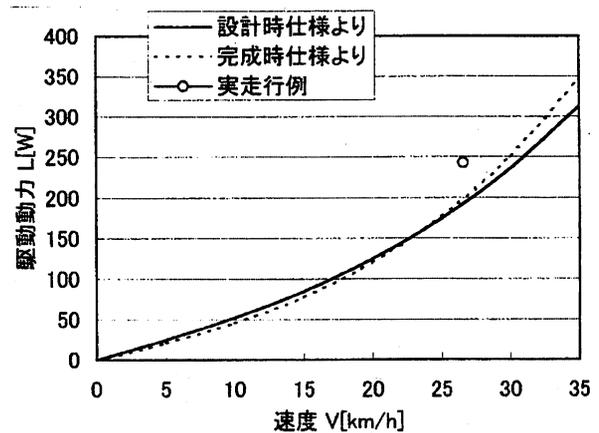


図2 速度と駆動動力の関係

2-3 駆動部

前述の予想平均速度は約27km/hと求められたが、やや意欲的に30km/hを設定し、モータの定格回転数付近での走行を目指した。モータ定格回転数は3000r.p.m.であり、30km/h程度の走行の場合、駆動輪回転数は約318r.p.m.で結局減速比は9.5程度(計算過程下記に示す)となり、減速機が必要となる。本研究では、図3に示す平歯車-平歯車(S45C)、チェーン sprocket (ピッチ:6.35)から成る2段減速機(ケース, ボールベアリング, シャフトを含む)を設計、マシニングセンター等を用いて製作を開始した。

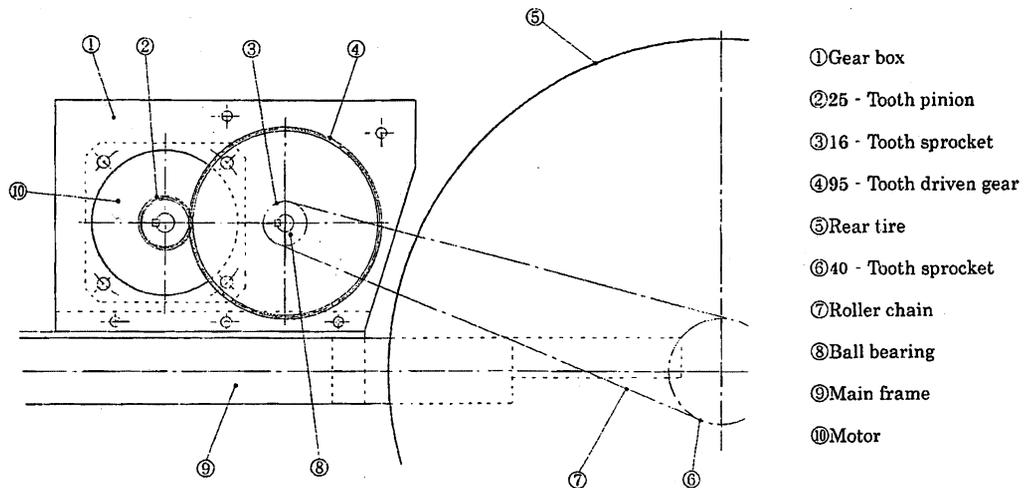


図3 動力伝達装置

○減速比 i の計算

一段目の減速には小歯車（歯数25枚），大歯車（歯数95枚）を使用するので，一段目の減速比 i_1 は

$$i_1 = 95 / 25 = 3.8$$

となる。二段目の減速には小スプロケット（歯数16枚），大スプロケット（歯数40枚）を使用するので，二段目の減速比 i_2 は

$$i_2 = 40 / 16 = 2.5$$

となる。これら i_1 ， i_2 より結局の減速比 i は次のようになる。

$$i = i_1 \times i_2 = 3.8 \times 2.5 = 9.5$$

2-4 太陽電池，蓄電池ならびに各機器の決定
(表1参照)

(1) 太陽電池

2002JISC レギュレーションによれば，H-2 部門で太陽電池の最大出力は480 Watt に抑えられているので貼付面積を加味し，表1に示すサイズの太陽電池10.44枚と決定した。この0.44枚についてであるが，表1に示す太陽電池は36セルの電池よりなり，そのうち16セルを切り出し，つまり $16/36 \approx 0.44$ 枚を接続したということである。結局5.22枚を直列に2並列で配置，図4にそれらを示すが一方は1~6，他方は7~12で最大出力は $10.44 \times 45 \approx 470$ Watt である。

(2) 最大出力点追尾装置 (MPPT)

使用する MPPT の仕様を表3に示す。太陽電池は日射量や温度，負荷などで最大出力動作電圧と最

大出力動作電流が決まり，従って最大出力点が変わるので，それに合わせて使用するのが効果的である。その役目をするのが最大出力点追尾装置，MPPT(Maximum Power Point Tracker) である¹⁾。

2-5 車体形状と構造 (表4参照)

(1) フレーム

フレームは簡単なトラス構造とし，各部材は厚さ5mm アルミプレートを通じてネジ結合されている。一例として図5の⑥（十字形プレート）がそれに当たる。部材材料には JIS A 6063 アルミニウム合金が用いられ，その強度については過去に製作されたソーラーカーでの経験から特に問題は無いと思われるが，念のため図4の①~⑤に示す箇所に歪ゲージ（メーカー：東京測器研究所 K・K，タイプ：FLA-10-23-1L，ゲージ長さ：10mm）を貼付，ラリー走行後に静歪計を用いて永久歪測定を実施した。

(2) ボディ (図1参照)

空気抵抗低減，即ち形状抵抗係数 C_d を小さくする目的から，ボディは下記の要領で製作を進めた。ボディ上部は風防と太陽電池で覆われるが，中央部をややふくらませ極薄い翼断面形とし，各種板材，合板を用いて太陽電池貼付面として製作した。

ボディ側面部は上から見て舟形を基本としたが，安全運転，居住空間確保の観点からやや強いふくらみを持たせた。また，後部は駆動力系，ブレーキ，車輪等のメンテナンスを考慮しボディ無しの構造

ソーラーカーの設計製作

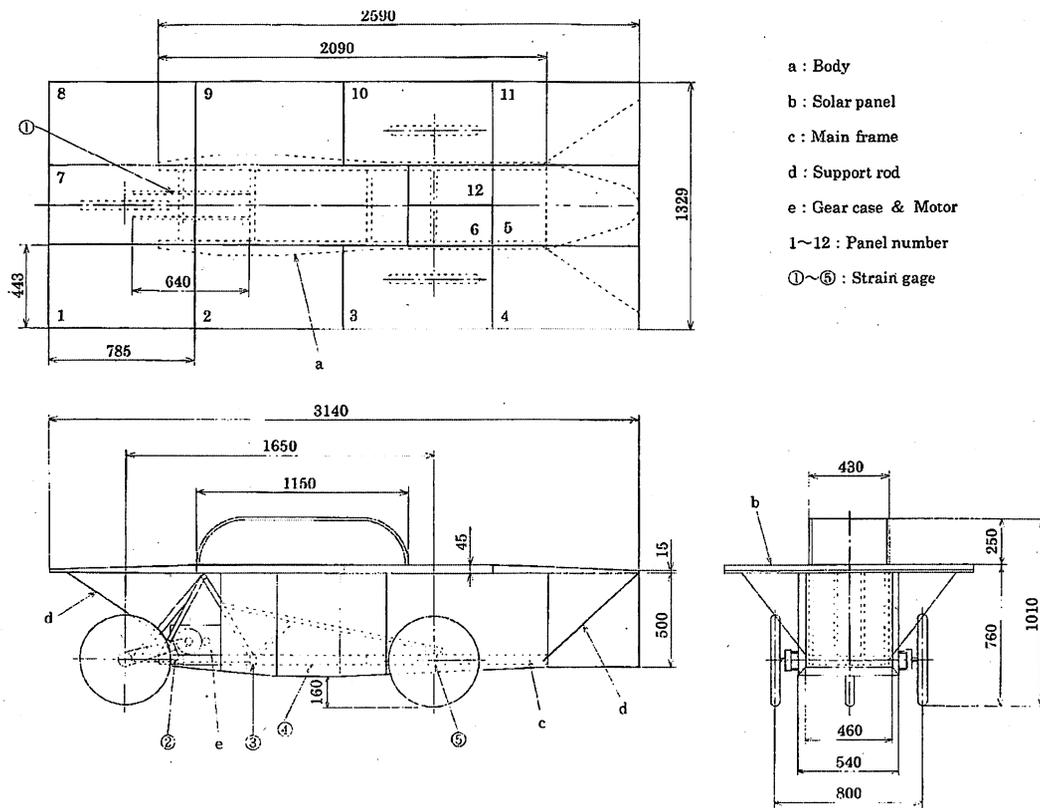


図4 車両寸法

とした。

用いたボディ材料は、前部湾曲部には塩化ビニール板（厚さ1mm）、側面部はのり付きパネル（厚さ7mm）で仕上げを行った。ボディ下面部には、ボディ前端より後輪の前端部付近まで前記ののり付きパネルを貼り付け、下面を滑らかにした。

3. レース内容

レギュレーションに沿った厳しい車両検査を1回で通過し、H-2部門で出場した本ソーラーカーは、3日間（合計実走行時間≒15.5時間）、総走行距離388km（平均速度25km/h）を足回りや電気系統部に発生しやすい致命的な故障はなく走行した。最終結果は総合で60台中50位、H-2部門では10台中7位という成績だった。天候は3日間通してソーラーカーの走行にとっては良好ではなく、2日目には小雨が降るなど、バッテリーの搭載量が極端に少ない本ソーラーカーには非常に厳しい状況だった。

また車体の挙動で感じたことは、サスペンションが無いことによる突き上げのひどさであった。全長31kmというロングコースであるのでこのような突

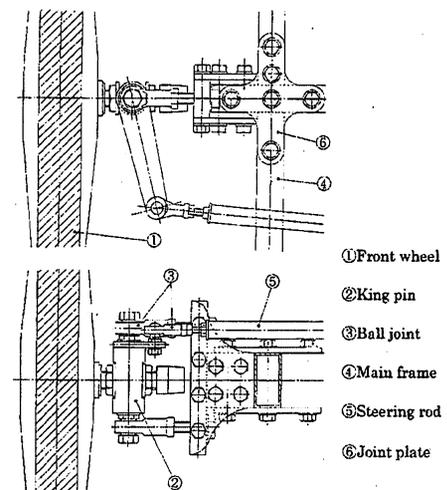


図5 舵取り装置

き上げはドライバーに肉体的・精神的な負担をかけることになる。更に本ソーラーカーはキャスト角をつけていないので、それに起因すると思われる直進性の悪さと、それに伴うステアリングの過敏な反応もみられた。これらの事項は今後の大きな検討課題

であろう。

4. ラリー時の日射量と走行速度

ラリー3日間を通じ、本ソーラーカーはトラブル、天候急変等に見まわれ、信頼できる走行データは下記に示すある時刻内に限られる結果となった。下記にその間の日射量とそれより得られる駆動動力、その間の走行速度を示す。

尚、大瀧村ラリーコースで日射量の測定はされておらず、直線距離にして約25km離れた秋田市気象台の日射量記録により駆動動力算定を進めた。

走行日時と時刻：2002 8/2 am11:36~pm12:48

走行時間：72分=4200秒

走行距離：31km

実際の平均走行速度：26.6km/h (図2の○印)

走行時の日射量 (秋田市気象台の測定値)

: 3.2 MJ/m²

$$\frac{3.2 \times 10^6 [\text{J}]}{4200 [\text{s} \cdot \text{m}^2]} = 763 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\text{実際の駆動動力} : L = \frac{763}{600} \times 191 = 243 [\text{W}]$$

(600[W/m²], 191[W] については2-1で詳述済) 実際取得した駆動動力は243[W]で図2に示す線図からは、速度が約30km/hと読み取れ、実際の走行速度が3 km/h程下回っている。この理由として、先に述べた転がり抵抗係数 μ_r 、形状抵抗係数 C_d の影響が考えられるので、これらの値を次に述べる試験方法により求める事にした。

5. 牽引法による転がり抵抗係数 μ_r 、形状抵抗係数 C_d について

5-1 牽引による全走行抵抗力Rについて

ソーラーカーが走行する際、一般の自動車と同様に転がり抵抗 R_r 、加速度抵抗 R_i 、勾配抵抗 R_g 、空気抵抗 R_a の各々が抵抗力として働く⁽²⁾。平坦な路面を一定速度で走行する場合、 R_i と R_g は零と見なせるので、車に働く抵抗力は R_r と R_a の和に等しい。従って、無風状況下で直線性の強い平坦路面上でソーラーカーを所定の速度に保ち、十分に車間距離をとり牽引、その力を読めば、それはその速度における R_r と R_a の和に等しい。 R_r は速度に関係無く一定と見なせば、先に述べた所定の速度の R_a はその時の牽引力 R から R_r を差し引くことで得られる。即ち、 $R_a = R - R_r$ である。

5-2 牽引による R_r 、 R_a の測定

走行抵抗測定のため大瀧村ラリーコースで図6に示す方法により走行中のバネ秤本体をビデオカメラで録画、モニターに再現し指示値把握を試みた。録画より、指示値は変動するものの指示針の動きはバネの自由振動に似た運動を繰り返す事から、バネ秤の最大指示値と最小指示値の平均値が牽引力の概略を表すと考える事にした。特に図7に示す R_r の読み取りでは歩行速度程度であるにもかかわらず指示値変動は見られたが、指示値振幅は小さく、タイヤ空気圧0.59[MPa](6気圧)では単純平均して13[N]程度であり、以後試験速度全てに於いて $R_r = 13[\text{N}]$ 一定とした。

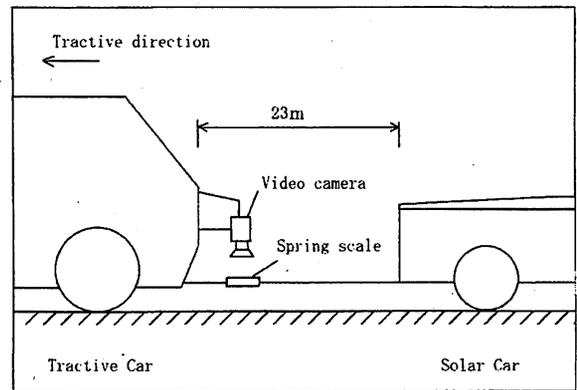


図6 牽引試験

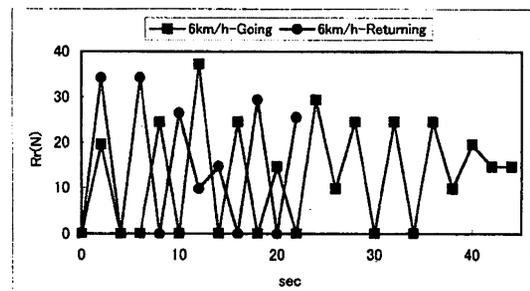


図7 時速6km/hでの転がり抵抗 R_r

5-3 転がり抵抗係数 μ_r の算定

ここで $R_r = 13[\text{N}] = \mu_r \times \text{車両質量 (150kg含ドライバー)} \times \text{重力加速度 (9.8m/s}^2)$ より $\mu_r = 1/113$ と算定される。完成車両の総質量は仕様にはほぼ等しく170kg程であったが、牽引時の安全確保のためバッテリー、消火器、調整バラストなどを取り外し150kgに落として実施した。求めるのは係数である

なのでこの影響は無いと考える。

5-4 各速度における R の測定

Ra 測定状況を以下に示す。

| |
|------------------------------|
| 実施日: 2002 9/9 |
| 天 候: 晴れ (弱風) |
| 走行区間: 10km |
| 走行道路: 平坦 (ほぼ直線) |
| 走行速度: 20, 30, 40, 50, 60km/h |
| (音声録音) |

この試験では、走行速度が60km/hにも達するので非常時には牽引ロープが容易に切断される様、細いロープ(φ3)を使用した。又、牽引側とソーラーカードライバーとは常に無線で交信しながら、10km/h ずつ速度を上げ測定を進めた。

5-5 形状抵抗係数 C_d の算定

$$Ra = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \text{ の関係より各速度 } V$$

に対する Ra が求められれば、 $\rho (=1.23\text{kg/m}^3)$, $A (=0.6\text{m}^2)$ は既知量故 C_d が算出される。ここで、 $Ra[N] = R - R_r = R - 13[N]$ であり、この試験により各速度での R が測定され、Ra が求まる。
※完成車両の前面投影面積であることに留意されたい。

5-6 試験結果

各速度に於ける Ra 全走行記録を図8に示す。速度が上がるにつれ Ra も増加するが、理想的な二次曲線は得られていない。ここで試験速度全般に渡って指示値の変動が見られる。特に高速になるにつれ指示値変動が激しく、期待した安定値が得られていない。その理由として、高速時ではバネ秤のスプリングの伸びが増大、結果的に大きな振幅の発生があげられる。又、60km/h では走行に対する不安感も高まり、指示値変動増加の一因となっている。次に各速度での形状抵抗係数 C_d (図9) であるが、往、復路共に0.6前後である。

この試験で得られた $C_d = 0.6$, $\mu_r = 1/113$, 完成車両の総質量 = 170kg, 完成車両の前面投影面積 = 0.6m^2 を用いて得た線図を図2に破線で示す。この線図は25km/h 付近で予想曲線から次第に離れ始め、走行性能低下の兆候が見られるが、増加した C_d , 前面投影面積の関与があげられる。

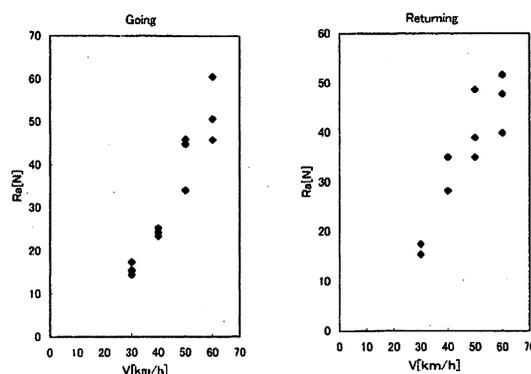


図8 各速度における Ra

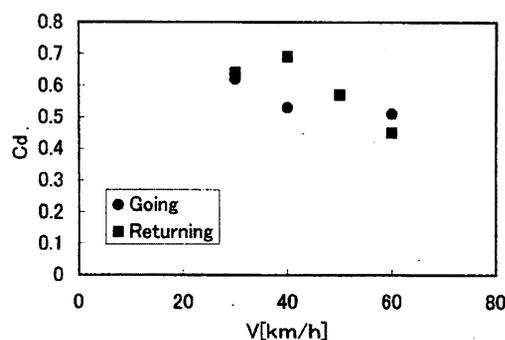


図9 各速度における C_d

| | | |
|------|---------------------------------------|---------------------|
| 太陽電池 | メーカー | 昭和シェル石油株式会社 |
| | 型式 | FL136 - SP - 93 |
| | セルのタイプ | 単結晶シリコン |
| | セルの変換効率 | 13.5% |
| | セルのサイズ | 80mm × 100mm |
| | セルの数量 | 36枚 |
| | セルの配列 | 9枚 × 4枚 (長方形) |
| | 表面保護方式 | フィルム密閉式 |
| | モジュールの電圧 | 17.8 V |
| | モジュールの面積(1枚) | 0.333m ² |
| | モジュールのサイズ(1枚) | 774mm × 430mm |
| | モジュールの重量 | 377g |
| | モジュールの数量 | 10.44枚 |
| | モジュールの配列 | 5.22枚直列 2並列 |
| | 総出力 (100mW/cm ² , 25°C) | 469.8 W |
| 総電圧 | 113.8 V | |
| 総重量 | 3.935kg | |

表1 車両仕様書1

| | | | | |
|------|---------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|
| 蓄電池 | タイプ | メーカー・型式 | 種類 | 重量 |
| | | 日本電池 K・K PXL12072 | 駆 動 用 | 2.7kg/個×4 個=10.8kg |
| | 弁式 (シール) 鉛蓄電池 | メーカー | 電 装 品 用 | 1kg/個×1 個=1kg |
| | | 日本電池 K・K PXL12023 | | |
| 総電圧 | 12V×4個=48V(駆動用) | | | |
| 定格出力 | 7.2Ah/20HR(1個)(駆動用) | | | |

表2 車両仕様書2

| | | | | |
|------|----------------|---|--|--|
| モータ | メーカー | 株式会社 安川電機 | | |
| | タイプ・型式 | DC ブラシサーボ UGRMEM-08SA | | |
| | コントローラ のタイプ | PWM 制御 | | |
| MPPT | メーカー | 株式会社 ツシマエレクトリック | | |
| | 型式 | PT208MV | | |
| | 制御方式 | DC/DC コンバーター(ステップ ダウンレギュレーター) PWM ハイサイドスイッチング | | |

表3 車両仕様書3

| | | | | | |
|-----------|-------------------|------------------------------|---------|------|-------|
| 車両寸法 | 全長 | 3140mm | | | |
| | 全幅 | 1329mm | | | |
| | 全高 | 1010mm | | | |
| | 軸間距離 | 1650mm | | | |
| 車輪間隔 | 前 | 800mm | 後 | 0mm | |
| | 重量(ドライブ無し) | 100kg | | | |
| 車体構造等 | フレーム(タイプ・材質) | ネジ止め構造 (JIS A 6063 アルミニウム合金) | | | |
| | ボディ材質 | のり付パネル (厚さ 7mm) | | | |
| | ステアリング | 両振り腕応用機構 (アッカーマン・ジャントー式) | | | |
| | ホイール | サイズ | 20inch | 数量 | 3個 |
| | | 構造 | スポーク | | |
| | タイヤ | サイズ | 20×1.75 | メーカー | : IRC |
| タイプ | | フリース タイル | | 6気圧 | |
| ブレーキ | 前 | 無し | | | |
| | 後 | キャリパー (2系統) | | | |
| 駆動装置・伝動装置 | チェーン・スプロケット (ピッチ) | 6.35), 平歯車 (モジュール: 1.5) | | | |
| | 小平歯車 (歯数25枚) | モータへ取り付け | | | |
| | 大平歯車 (歯数95枚) | 中間軸へ取り付け | | | |
| | 小スプロケット (歯数16) | 中間軸へ取り付け | | | |
| | 大スプロケット (歯数40) | 後車輪へ取り付け | | | |

表4 車両仕様書4

6. 結 言

・本研究では第4回 JISC(2002) ハーフサイズカテゴリーストッククラス H-2 部門での参加を企画、ラリーレギュレーションに基づき車両の設計製作を行い、ラリーにのぞんだ。その結果は、総合50位の成績で、平均速度は25km/hであった。

・バネ秤を用いた牽引法によりソーラーカーの転がり抵抗 R_r 、空気抵抗 R_a を測定した。走行中にバネ秤の指示値をビデオカメラで録画、モニターに再現することで指示値を読み取り平均値を全抵抗 (R_r+R_a) とした。その結果転がり抵抗係数 μ_r は約 1/113、各速度での形状抵抗係数 C_d は往、復路共に0.6前後と得られた。

・車両はおおむね設計図面に従って製作されたが、予定仕様と製作された車両の仕様間に若干の相違を生じた。その結果時速25km/hまでは予想通りの走行能力であるが、それを超えると予想した性能を下回る傾向がある。

・フレーム強度確認のため、危険と思われる箇所に歪ゲージを貼付、ラリー後の歪測定結果はほとんど弾性変形内 (0.02%以下) であり、走行の安全性を

確認した。

尚、搭載バッテリーの不足により、上り坂で停止するトラブルが発生、充電のために長時間の停止を余儀なくされた。バッテリーは30kg程の搭載が必要と考える。

・製作した減速機から走行中かなりの騒音が発生、持続した。感覚的ではあるが、駆動伝達効率の低下を招いている恐れがあり、今後の改良が必要と思われる。

謝 辞

終わりに、製作、JISC 参加にご協力願った機械工学科の各教官、技官の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 遠藤・金・古浜・金山：新エネルギー自動車 (1995) pp.251 株式会社山海堂
- (2) 原田：流体の力学 (1965) pp.219 槇書店
- (3) 米田・山田・吉田：ソーラーカー製作ガイドブック (1994) パワー社
- (4) 尾崎：自動車工学 (1972) 森北出版株式会社
- (5) 林・富坂・平賀：機械設計法 (1988) 森北出版株式会社
- (6) 林：機械製図 (1998) 実教出版株式会社
- (7) 理化年表 (1985) 丸善株式会社
- (8) 伊藤：平成10年度秋田工業高等専門学校専攻科特別研究論文
- (9) 山崎・杉沢・武田：秋田工業高等専門学校研究紀要第31号 別刷 (1996) pp39-44
- (10) 山崎・杉沢・伊藤：秋田工業高等専門学校研究紀要第32号 別刷 (1997) pp9-14
- (11) 山崎・宮腰・渡部：秋田工業高等専門学校研究紀要第37号 別刷 (2002) pp45-48