

## 競技参加のためのソーラーカーの最適走行シミュレーション\*

金山 公夫\*\* 馬場 弘\*\* 澤田 正剛\*\*\* 遠藤 登\*\*  
小関 清憲\*\* 田中 俊輔\*\* 手塚 博文\*\*\*\* 増田 弘人\*\*\*\*

(平成3年10月5日受理)

### Simulation on Optimum Running Mode of a Solar Car to Participate the Solar Challenge

Kimio KANAYAMA, Hiromu BABA, Seigo SAWADA, Noboru ENDO, Kiyonori OZEKI,  
Shunsuke TANAKA, Hirofumi TEZUKA and Hiroto MASUDA

#### Abstract

With the joint R & D of Kitami Institute of Technology and Kyocera Corporation, solar-powered electric vehicles No.1 (SEV-1) and No.2 (SEV-2) were made in 1989 and 1990 respectively. We subsequently improved them so they could compete in the "Solar Challenge in Hokkaido '91" road race in Kitami City. A simulation calculation was done beforehand to determine the optimum running mode, or how fast the car could run the race course with minimum power consumption.

For calculation purpose, solar radiation was measured at Kitami Institute of Technology, and the course conditions, such as elevation changes, cornering and surface roughness of the road, traffic signs and so on, were taken into account as input data. With limited speed on a horizontal and an upward sloping roads, and with unlimited speed on downward sloping roads, the minimum running time for the cars SEV-1 and SEV-2 could be determined under 80% consumption of the energy stored in the battery.

#### 1. ま え が き

地球環境の保全と資源エネルギーの保存を標榜して、太陽エネルギーに動力源を求めたソーラーカーの研究開発が各地で鋭意行なわれている。今回北見市でソーラーチャレンジイン北海道'91が開催されるに当たり、北見工業大学と京セラが、既に共同開発したSEV-1およびSEV-2を改良して出場することを想定して、日射量、コースの上り下り、コーナー、路面の状態および走行標識等を考慮し、一定の消費電力のもとで56.4kmをいかに速く走破するかを目標に、競技に先立って適切な走行モードのシミュレーション計算を行なった。

\* 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会にて講演(3.9.21)

\*\* 北見工業大学 機械工学科

\*\*\* 北見工業大学 一般教育等(自然)

\*\*\*\* 京セラ株式会社

第1表 北見市における9月標準晴天日の過去13年間の日射量平均値  
W/m<sup>2</sup>

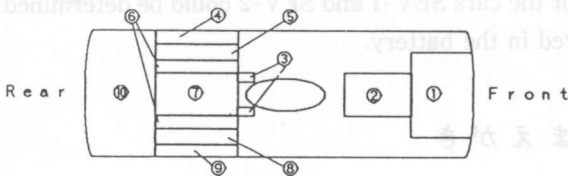
時刻	直達日射量	全天日射量
4:00-5:00	5.12	26.86
5:00-6:00	99.07	84.30
6:00-7:00	386.28	186.86
7:00-8:00	528.49	307.33
8:00-9:00	641.28	416.40
9:00-10:00	738.95	484.07
10:00-11:00	722.67	497.33
11:00-12:00	747.33	483.26
12:00-13:00	670.23	416.98
13:00-14:00	649.77	346.98
14:00-15:00	629.42	248.14
15:00-16:00	461.74	136.86
16:00-17:00	245.23	56.86
17:00-18:00	16.98	9.30

## 2. 計算式およびデータ

### 2.1 日射量

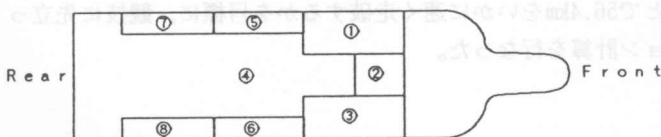
第1表は北見工業大学で測定された過去13年間の9月の標準晴天日における水平面全天日射量、法線面直達日射量の時間平均値を示す。このデータと道路勾配および方向をもとに、第1図のように分割されたソーラーカーパネルの各要素面の傾斜面日射量を求め、発電量を算出する。ここで、ソーラーカーの座標を地球上の座標に置き換え、ソーラーパネルへの日射入射量を求める。第2図(a)はソーラーカーの座標系におけるパネルの位置を示し、パネルの傾斜角を $\theta$ 、進行方向に対して時計周りを正とした方向角を $\beta$ とすると、パネルの法線ベクトル $P$ は

SEV-1



No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\theta$ [°]	11	5	0	24	18	6	8	18	24	12
$\beta$ [°]	0	0	0	-90	-90	180	180	90	90	180
AR [m <sup>2</sup> ]	0.96	0.32	0.02	0.16	0.16	0.32	0.32	0.16	0.16	1.26

SEV-2



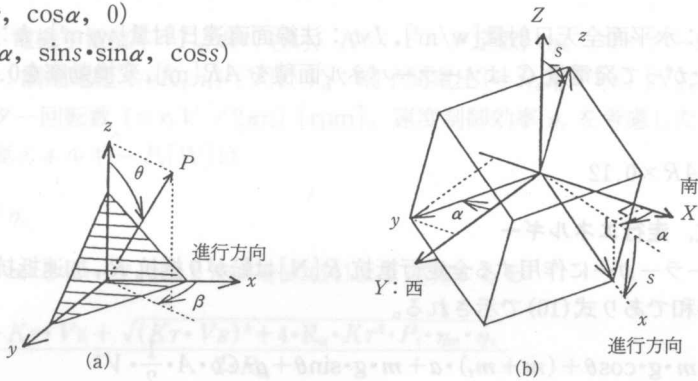
No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta$ [°]	20	0	20	6	11	11	6	6
$\beta$ [°]	-90	0	90	180	-90	90	-90	90
AR [m <sup>2</sup> ]	1.44	0.3168	1.44	2.976	0.36	0.36	0.36	0.36

第1図 ソーラーパネルの傾斜角 $\theta$ と方向角 $\beta$ および分割面積AR

$$P = (\sin\theta \cdot \cos\beta, \sin\theta \cdot \sin\beta, \cos\theta) \tag{1}$$

となる。第2図(b)は真南から西へ $\alpha$ の方向で $s$ の下り勾配を走行している時のソーラーカーの座標系と地球上の座標系の関係を表わし、進行方向角 $\alpha$ は路面勾配 $s$ が上りなら $\alpha+180^\circ$ とし、下りなら $\alpha$ とする。この図においてZ軸について $\alpha$ 回転したところのY軸を中心に、 $s$ 回転したそれぞれの単位ベクトルを地球上の座標系で表わすと、

$$\begin{aligned} x &= (\text{coss} \cdot \cos\alpha, \text{coss} \cdot \sin\alpha, -\text{sins}) \\ y &= (-\sin\alpha, \cos\alpha, 0) \\ z &= (\text{sins} \cdot \cos\alpha, \text{sins} \cdot \sin\alpha, \text{coss}) \end{aligned} \tag{2}$$



第2図 (a)ソーラーカーの座標系のパネルの位置及び(b)ソーラーカーと地球の座標関係

ここで、ソーラーカー上から地球上への座標変換の行列  $T$  は

$$T = \begin{pmatrix} \text{coss} \cdot \cos\alpha & -\sin\alpha & \text{sins} \cdot \cos\alpha \\ \text{coss} \cdot \sin\alpha & \cos\alpha & \text{sins} \cdot \sin\alpha \\ -\text{sins} & 0 & \text{coss} \end{pmatrix} \tag{3}$$

さらに、地球の水平面を基準としたパネルの法線ベクトル  $P_t$  は

$$P_t = \begin{pmatrix} P_{tx} \\ P_{ty} \\ P_{tz} \end{pmatrix} = T \cdot P \tag{4}$$

となる。すなわち、ソーラーパネルの水平面に対する角度  $\theta'$ 、ソーラーパネルの真南に対する方位角  $\alpha'$  は

$$\theta' = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{P_{tx}^2 + P_{ty}^2}}{P_{tz}} \right) \tag{5}$$

ただし、 $P_{tz} = 0$  のとき、 $\theta = \pi/2$

$$\alpha' = \tan^{-1}(P_{ty}/P_{tx}) \tag{6}$$

ただし、

$$P_{tz} = 0 \text{ で } P_{ty} > 0 \text{ の時、 } \alpha' = \pi/2$$

(1)  $P_{ty} < 0$  の時,  $\alpha' = -\pi/2$

$P_{ty} = 0$  で  $P_{tx} > 0$  の時,  $\alpha' = 0$

$P_{tx} < 0$  の時,  $\alpha' = \pi$ 。

水平面に対するパネルの取付角  $\theta'$  および  $\alpha'$  のソーラーカーが  $\alpha$  方向の路面を走行するとき、パネルに入射する日射量  $I_p$  [ $\text{w}/\text{m}^2$ ] は、反射日射量を無視すると

$$I_p = I_{ND} \cdot \cos i + (I_{HT} - I_{ND} \cdot \sin h) \cdot (1 + \cos \theta') / 2 \quad (7)$$

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \theta' + \cos h \cdot \sin \theta' \cdot \cos(A - \alpha') \quad (8)$$

ここで,  $I_{HT}$ : 水平面全天日射量 [ $\text{w}/\text{m}^2$ ],  $I_{ND}$ : 法線面直達日射量 [ $\text{w}/\text{m}^2$ ],  $h$ : 太陽高度 [ $^\circ$ ],  $A$ : 方位角 [ $^\circ$ ]。したがって発電量  $G$  はソーラーパネル面積を  $AR$  [ $\text{m}^2$ ], 変換効率を 0.12 とすると式(9)で示される。

$$G = I_p \cdot AR \times 0.12 \quad (9)$$

## 2.2 走行抵抗, 走行エネルギー

走行中のソーラーカーに作用する全走行抵抗  $R$  [ $\text{N}$ ] は転がり抵抗  $R_r$ , 加速抵抗  $R_g$ , 登坂抵抗  $R_c$ , 空気抵抗  $R_a$  の和であり式(10)で示される。

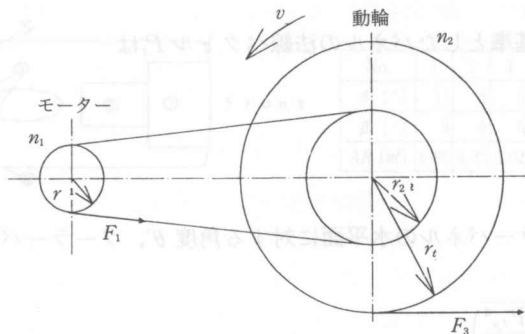
$$R = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta + (m + m_t) \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \theta + \rho \cdot C_D \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \quad (10)$$

ここで,  $\mu_r$ : 転がり抵抗係数,  $m$ : 車体の総質量 [ $\text{kg}$ ],  $\rho$ : 空気密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m_t$ : 回転部分の総質量 [ $\text{kg}$ ],  $a$ : 加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $C_D$ : 空力抵抗係数,  $A$ : 車の前方投影面積 [ $\text{m}^2$ ]。

第3図はソーラーカーの駆動系を示す。全走行抵抗  $R$  は, 駆動力  $F_3$  [ $\text{N}$ ] に等しく,

$$F_3 = R_g + R_c + R_r + R_a = (m + m_t) \cdot a + R_c + R_r + R_a \quad (11)$$

ここで,  $a$ :  $(v - v_0) / \Delta t$ ,  $v$ : 到達速度 [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $v_0$ : 現在速度 [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $\Delta t$ : 時間 [ $\text{s}$ ]。



第3図 ソーラーカーの駆動系

また, 駆動力はモータ軸トルク, 回転半径, 駆動効率で表わすと式(12)となる。

$$F_3 = r_r \cdot (T_m / r_t) \cdot \eta_d \quad (12)$$

ここで、 $r_r$ :減速比、 $T_m$ :モーター軸トルク[Nm]、 $r_t$ :タイヤの半径[m]、 $\eta_d$ :駆動効率。  
式(11)と式(12)よりモーター軸トルクを導くと

$$T_m = \frac{r_t}{\eta_d \cdot r_r} \cdot \{ (m + m_t) \cdot a (R_c + R_r + R_a) \} \quad (13)$$

直流モーターの入力  $P_m$ [W] は、モーター軸トルクから求めた電機子電流と端子間電圧の積をモーター効率で割ったもので式(14)となる。

$$P_m = I_a \cdot V_a / \eta_m \quad (14)$$

ここで、 $I_a$ :電機子電流(=  $T_m / K_T$ ) [A]、 $K_T$ :トルク定数、 $\eta_m$ :モーター効率、 $R_a$ :電機子抵抗[Ω]、 $V_E$ :誘起電圧(=  $K_E n_1$ ) [V]、 $V_a$ :端子間電圧(=  $R_a I_a + V_E$ ) [V]、 $K_E$ :誘起電圧定数、 $n_1$ :モーター回転数(=  $r_r V / 2\pi r_t$ ) [rpm]。速度制御効率  $\eta_v$  を考慮したソーラーカーの走行のための所要エネルギー  $P_t$ [W] は

$$P_t = P_m / \eta_v \quad (15)$$

所要エネルギーからモーター軸トルクを式(14)より逆算すると

$$T_m = \frac{-K_T \cdot V_E + \sqrt{(K_T \cdot V_E)^2 + 4 \cdot R_a \cdot K_T^2 \cdot P_t \cdot \eta_m \cdot \eta_v}}{2 \cdot R_a} \quad (16)$$

となる。さらにモーター軸トルクから加速度  $a$  を逆算し、到達速度  $v$ 、距離  $L$  を算出すると、式(17)(18)および(19)になる。

$$a = \frac{1}{m + m_t} \cdot \left\{ \frac{r_r}{r_t} \cdot \frac{T_m}{\eta_d} - (R_c + R_r + R_a) \right\} \quad (17)$$

$$v = v_0 + a \cdot \Delta t \quad (18)$$

$$L = L_0 + \frac{v + v_0}{2} \cdot \Delta t \quad (19)$$

ここで、 $L_0$ :既走行距離[m]。各コーナーでの減速距離  $L_d$ [m] は

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = (R_c + R_r + R_a + F_b) \cdot L_d + \frac{1}{2} m \cdot v_{cor}^2 \quad (20)$$

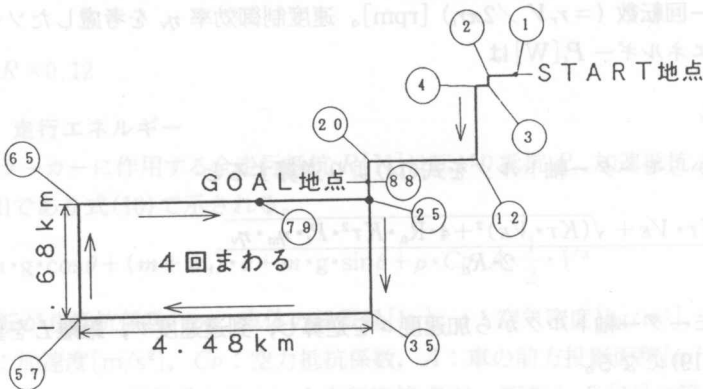
$$L_d = \frac{m \cdot (v_0^2 - v_{cor}^2)}{2 \cdot (R_c + R_r + R_a + F_b)} \quad (21)$$

ここで、 $v_{cor}$ :コース進入速度 [m/s]、 $\mu$ :路面とタイヤの摩擦係数、 $F_b$ :ブレーキ力 [N] (=  $\mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \cdot 0.2$ )。  $R_a$  に対する速度は  $v_0$  と  $v_{cor}$  の算術平均値を用いる。ソーラーカーへの供給電力とタイヤでの発生仕事率から求めた総効率  $\eta_t$  は

$$\eta_t = \frac{F_b \cdot v}{P_t} \times 100 \quad (22)$$

### 2.3 競技用コース概要

コースは第4図に示すように北見工業団地をスタート地点に広郷と訓子府町にまたがる周回コースで総延長56.4km, 最大勾配上り7.1%の片側一車線のアスファルト舗装の公道である。スタート地点から周回コースまでの4.06kmは途中5つの直角カーブがあり全体的に緩い上り勾配となっている。周回コースに入ると最初の直角カーブまでは1.68kmの緩い下りで, 方位角(真南を0°, 右回りを正)は $-5^\circ$ となっている。最初の直角カーブを回るとコース中最も難関な上り勾配7.1%を迎え, 方位角 $85^\circ$ の4.48kmに下り勾配が続く。次の直角カーブを過ぎると方位角 $175^\circ$ の1.68kmの前半は上り, 後半下りとなっている。最終直角カーブを過ぎると最大勾配7.3%の下りを方位角 $-85^\circ$ で4.48km走り12.32kmの周回コースのスタートへ戻る。この周回コースを4周しゴールとなる。全体的に前半が上りで, 後半が下りの平坦部がほとんどない起伏に富んだ周回コースとなっている。

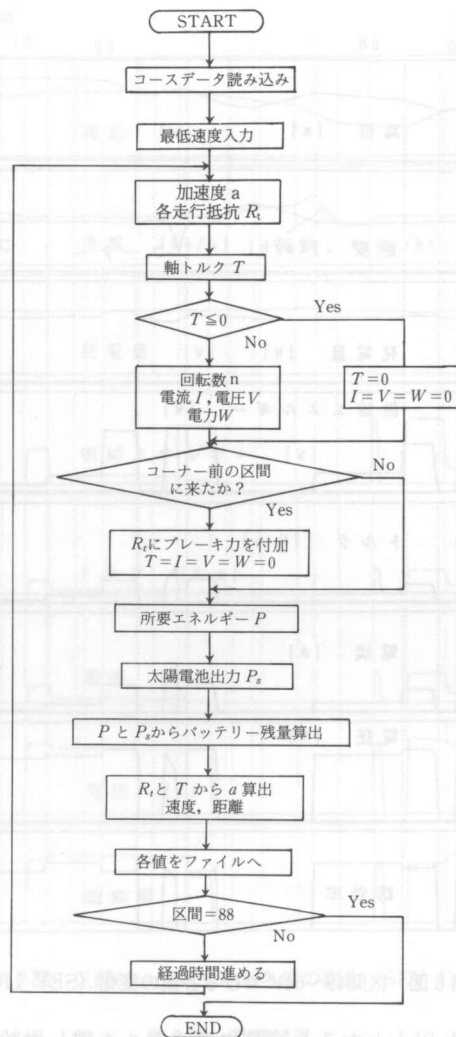


第4図 コース概要図

### 3. 走行モードシミュレーション

本シミュレーションはコースを88に分け, 各区間の勾配, 方向及び時刻から各時刻における太陽電池出力, 速度, 走行距離, モータ端子間電圧, 電機子電流, モータ軸トルク, 供給エネルギー, 総効率を算出し, 最後に所要時間, 消費仕事と, 太陽電池依存率を算出するものである。第5図に本シミュレーションのフローチャートを, 第2表にSEV-1, SEV-2の諸元を示す。シミュレーションを行なうに当たり, 各区間における最低限界速度を設定する。下り坂などで速度が設定した限界速度以上になる場合は, アクセルを踏まず供給エネルギーを0Wとし, ブレーキも掛けないこととする。また, 各コーナーにおいては, 速度を10km/h前後, 区間79では路面に凸部があり危険なため, 速度を40km/hに抑えている。供給エネルギーは, 太陽電池出力での不足分をバッテリーにて補うこととした。最適化への第一近似としてバッテリー容量の80%を使って所要時間を最短になるように, 各区間の最低限界速度を設定して行なう。実際には, 加速する箇所を最低限にするために, 周回コースは一定の最低限界速度として与え, 周回コースに入る前は, その値の70%の値を与えた。計算に必要な日射量は第1表の日射量の午前10時の値を用い, その値の100% (快晴), 60% (晴れ), 30% (曇り) について, それぞれシミュレーションを行った。ただし, 風と雨の影響はないものとした。

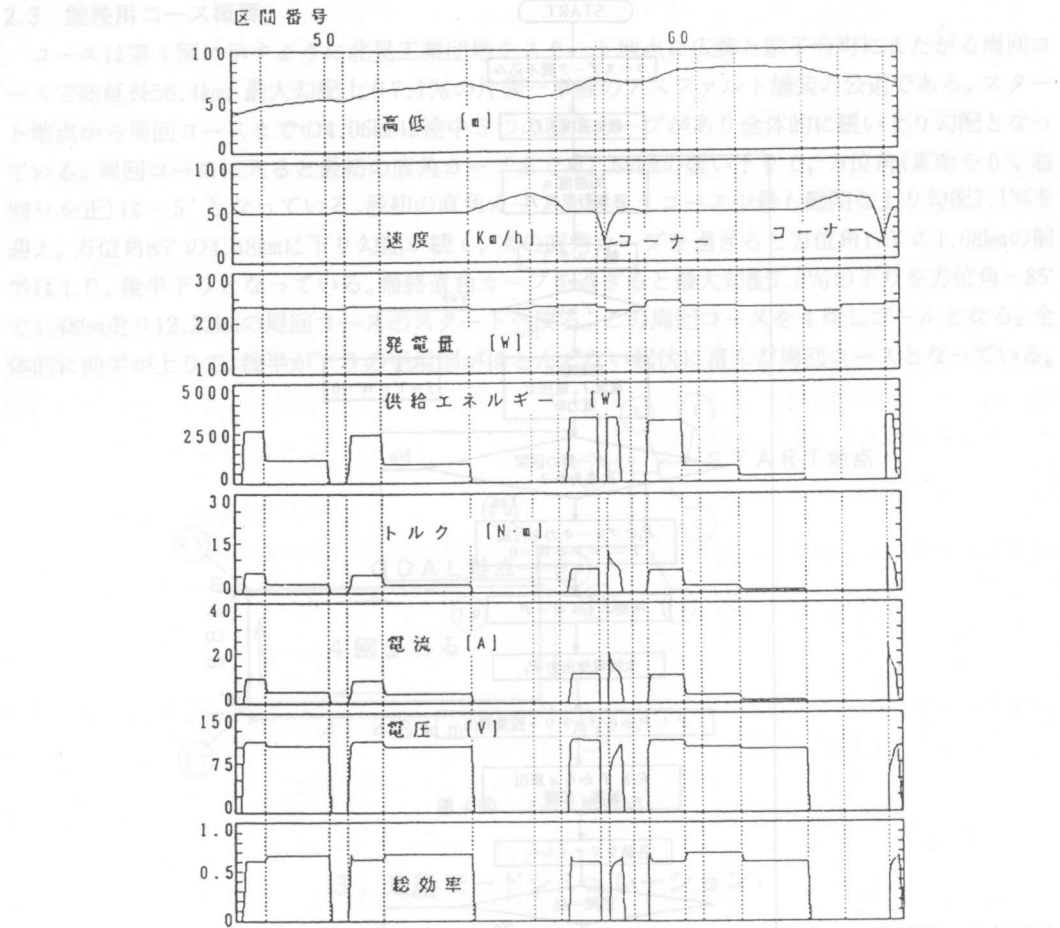
第6図はSEV-1の日射量100%, 最低限界速度49km/hでのコース区間49~64におけるシミュレーションの結果をグラフ化したものである。区間52~53は上り坂で最低限界速度49km/hを維持しており, 供給エネルギーもほぼ1000Wと一定である。区間53を過ぎると下り坂となり, 速度が加



第5図 シミュレーション・フローチャート

第2表 SEV-1, SEV-2諸元

	SEV-1	SEV-2
車体総重量 [kg]	200	210
ころがり抵抗係数	0.005	0.005
空気抵抗係数	0.15	0.13
前面投影面積 [m <sup>2</sup> ]	0.777	0.928
速度制御効率	0.92	0.92
駆動効率	0.70	0.70
モーター効率	$0 \leq T \leq 12.5 [\text{kg-cm}]$ のとき $\eta_m = 11.253 + 23.677 \cdot \ln(2T + 0.622) [\%]$ $T > 12.5 [\text{kg-cm}]$ のとき $\eta_m = 93.926 - 1.841 \cdot \ln(2T) [\%]$ T: トルク [kg-cm]	$0 \leq T \leq 25 [\text{mm-cm}]$ のとき $\eta_m = 11.253 + 23.677 \cdot \ln(2T + 0.622) [\%]$ $T > 25 [\text{mm-cm}]$ のとき $\eta_m = 93.926 - 1.841 \cdot \ln T [\%]$ T: トルク [kg-cm]
慣性質量 [kg]	10.0	10.0
路面とタイヤの摩擦係数	0.8	0.8
モーターの定格出力 [W]	750	1100
モーターの定格トルク [kg-cm]	35	70
減速比 [歯数/12]	2.83	2.83
タイヤ直径 [mm]	500	580
太陽電池出力 [W]	480	1370

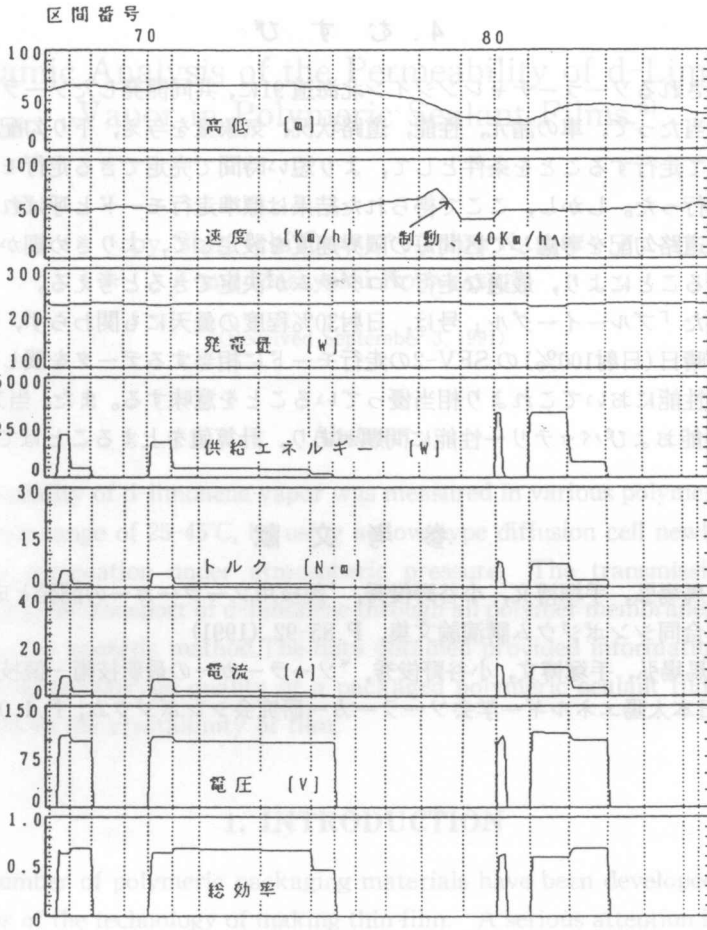


第6図 区間49～64における各値の変化 (SEV-1)

速され、最低限界速度49km/h以上となると同時にアクセルを離し供給エネルギーは印加されず0Wとなる。区間54から再び上り坂となり、速度が減速され、49km/hを切るとアクセルを踏み、供給エネルギーがほぼ3000Wまで急上昇している。また、区間56でブレーキをかけコーナー進入速度を10km/hまで落としコーナーを回ると再び最低限界速度49km/hまで加速される。従って、供給エネルギーはブレーキを掛けると同時に0Wとなり、コーナーを回り加速すると同時にほぼ3000Wまで急上昇する。モータートルク、電流は供給エネルギーとほぼ同様の傾向となっている。また、モーター電圧はエネルギー印加時はほぼ一定で100V前後で、総効率はエネルギー印加時ほぼ60%前後となっている。ソーラーパネル発電量は道路の勾配、方向に関係なくほぼ一定で230W前後となっている。

第7図は第6図と同様にSEV-1の区間66～85の各値をグラフ化したものである。区間66～85の下り勾配では区間49～64の上り勾配と比較すると全体的に供給エネルギーは少なくなっている。最後に本シミュレーションの計算結果を第3表に示す。





第7図 区間66~85における各値の変化 (SEV-1)

第3表 計算結果

		SEV-1			SEV-2			
日射量	[%]	100	60	30	100	60	30	
最低限界速度	区間	1~24	34.3	31.6	29.8	38.7	33.7	29.6
		25~88	49.0	45.1	42.5	55.3	48.2	42.3
勾配抵抗	$P_c$ [KJ]	858.7	858.9	865.5	881.6	924.0	943.6	
転がり抵抗	$P_r$ [KJ]	296.4	284.1	277.3	364.9	330.3	308.9	
空気抵抗	$P_a$ [KJ]	397.3	323.6	280.9	594.0	414.8	303.3	
加速度抵抗	$P_g$ [KJ]	396.5	326.6	278.5	740.2	523.5	361.3	
総抵抗	$P_t$ [KJ]	1948.9	1793.2	1702.2	2580.8	2192.5	1917.2	
所要エネルギー	$P$ [KJ]	3134.8	2928.9	2792.8	3711.4	3286.6	2954.9	
	$P_c/P_t$ [%]	44.07	47.90	50.86	34.16	42.14	49.22	
	$P_r/P_t$ [%]	15.21	15.84	16.29	14.14	15.06	16.11	
	$P_a/P_t$ [%]	20.39	18.05	16.50	23.02	18.92	15.82	
	$P_g/P_t$ [%]	20.35	18.21	16.36	28.68	23.88	18.85	
	$P_t/P$ [%]	62.17	61.22	60.95	69.54	66.71	64.88	
太陽電池依存率	[%]	11.2	4.9	0.26	26.2	16.7	7.4	
所要時間		1°08'33"	1°13'13"	1°16'45"	1°03'40"	1°10'42"	1°17'47"	
平均速度	[km/h]	46.88	43.89	41.87	50.48	45.45	41.31	

### 4. む す び

北見市で開催されるソーラーチャレンジイン北海道'91に、共同開発したソーラーカーを携えてレースに望むに当たって、車の諸元、性能、道路状況、気象量を与え、下り勾配以外は一定の限界速度を維持して走行することを条件として、より短い時間で完走できる走行モードを決めるために模擬計算を行った。しかし、ここで得られた結果は標準走行モードと呼ばれるべきもので、これをベースに道路勾配を考慮して区間毎の限界速度を設定して、よりきめ細かな走行パターンを与えて計算することにより、最適な走行プログラムが決定できると考える。

今回の優勝した「ブルーイーグル」号は、日射30%程度の曇天にも関わらず、第3表に示す計算結果のうち快晴日(日射100%)のSEV-2の走行モードに相当するデータを残したことは、機体の諸元及び走行性能においてこれより相当優っていることを意味する。また、当方のSEV-1及びSEV-2は操縦性能およびバッテリー性能に問題があり、計算値を上まえることはできなかった。

### 参 考 文 献

- 1) 金山公夫, 馬場弘, 手塚博文, 小谷野俊秀, "競技用ソーラーカーの開発と成果", 第4回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集, P.85-92 (1991)
- 2) 金山公夫, 馬場弘, 手塚博文, 小谷野俊秀, "ソーラーカーの最新技術-競技用ソーラーカーの開発", 日本太陽エネルギー学会ソーラーカー研究会シンポジウム, P.1.01-1.13 (1991)