

PVセル面積およびバッテリー容量の 比率を異にするソーラー・カーの走行性能*

Running Performance of a Solar Car When Changing
Ratio of PV - Cell Area and Battery Capacity

遠藤 登^{*1}
Noboru Endoh

金山 公夫^{*1}
Kimio Kanayama

馬場 弘^{*1}
Hiromu Baba

Abstract

The performance of a solar car(SC) and an electric car(EC) is compared by changing ratio of solar-panel(PV-cell) area and battery capacity when running a specified course under the conditions of defined intensity of insolation. As a running performance, it is demonstrated that, a mixed car using battery together with solar-panel is better than solar car only with solar-panel or the electric car only with battery.

Key Words : Solar car, Electric car, PV-cell, Running performance, Insolation, Battery

1. まえがき

わが国の自動車保有台数は6300万台(平成5年度)に達し、それによる排気ガスが大気汚染の一因となっている。そこで西暦2000年以降の一人当たり二酸化炭素(CO₂)排出量を1990年レベルに低減させる行動計画が策定され、また電気自動車を西暦2000年までに20万台生産する目標が立てられ、産官学が総力を結集してその遂行にあっている。

一方代表的な無公害車の一つとして期待されるソーラー・カーが登場し、数年前から国の内外においてソーラー・カー大会が多数開催され、年とともにそれへの参加台数が増大するとともに、参加者の階層が拡大し、非常に活況を呈している。

たとえば1993年11月にオーストラリアにおいて世界最大のソーラー・カー・レース「第3回ワールド・ソーラー・チャレンジ(WSC)」が開催され、世界各国から最先端の技術で武装しあるいは種々趣向を凝らした53台のソーラー・カーが集結し、3000(km)に及ぶ酷暑のコースで熱戦が繰り広げられた。わが国からは21台の多数が参加し、上位5位のうち3台までが日本車が占め、特筆すべきはホンダ・ドリム号が平均時速84.96(km/h)の超ど級の記録をう

ち立てて優勝したことである。これによってわが国のソーラー・カー技術は世界のトップレベルにあることが実証された。

競技で得られた技術を生かし、国の援助のもとに太陽電池メーカーは実用ソーラー・カーの開発に乗り出し、既に二、三の試作車が公開されている。一方自動車メーカーは実用電気自動車(通称EVといわれる)の開発に着手し、これを官公庁、自治体などが試行的に導入するなど、ノーエミッション・カーの時代も間近かに迫った感を抱かせる。

本研究はこれまでの民間企業との共同研究で開発されたレース用ソーラー・カーの技術を土台に、太陽電池主体のソーラー・カー(SC)と蓄電池主体の電気自動車(EC:ソーラー・カーの延長線上にある電気自動車)を両端に置き、その間に太陽電池と蓄電池の配分を異にする中間型のソーラー・カーを設定して、SCとECの成分割合によってその性能がどのように変化するかシミュレーションによって解析した。

2. 走行シミュレーション⁽¹⁾⁽²⁾

対象とするソーラー・カーはWSC仕様のものをベースに、太陽電池パネル(PVセル)面積と蓄電池(バッテリー)容量の比率を幾通りかに変えたものを基本モデルにして、これを異なる日射量のもとで特定のコースを走行させて性能評価を行なう。

* 原稿受付 平成6年8月8日

*1 会員, 北見工業大学機械システム工学科(〒090 北見市公園町169)

表1 各タイプのSC及びECの諸元

	SC	75SC	50SC	25SC	EC
	type 1	type 2	type 3	type 4	type 5
PV-cell					
convert. eff. (%)	13.0(17.0)	13.0	13.0	13.0	13.0
module ratio (%)	100.0	75.0	50.0	25.0	0.0
area (m ²)	8.0	6.0	4.0	2.0	0.0
max. output (W)	1040	780	520	260	0
battery capacity (kWh)	1.00	2.25	3.50	4.75	6.00
car weight (kg)	250.0	340.0	425.0	515.0	600.0
projected area (m ²)	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
roll resist.	0.0050	0.0061	0.0075	0.0080	0.0100
wind resist.	0.150	0.225	0.300	0.400	0.500
speed contr. eff. (%)	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
mass inertia (kg)	7.00	10.00	13.00	16.00	19.00
frict. coeff.	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
motor output (W)	2000	4000	6000	8000	10000
motor torque (kg-cm)	70	130	160	250	320
gear ratio	4.33	4.33	4.33	4.33	4.33
tire dia. (mm)	560	560	560	560	560

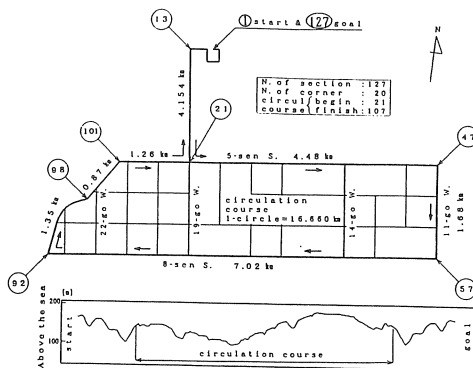


図1 ソーラーチャレンジイン北海道'93のコース

シミュレーションに用いたSC及びECの諸元は表1に示す。タイプ1はパネルの最大発電量とバッテリー容量がほぼ同じSCである。タイプ2から3に移行するにつれてバッテリー容量、モータ定格出力、車体重量、前面投影面積、空気抵抗係数及び転がり抵抗係数等が増加し、それに従い、パネル出力が減少する。タイプ5がバッテリーだけのECである。

ここで、車体の形状、寸法等の諸元や性能値は、タイプ1のSCにはWSC仕様に従って与え、タイプ5のECは国内太陽電池メーカによって既に製作、公表されている小型ワゴンタイプのコンピュータ・カー(SCV)を参照して想定される諸値を与えた。

従って乗車できる定員や積載荷重等についてはSCは一人乗りで50(kg)程度の荷重、およびECは二人乗りで100(kg)程度の荷重となり、搬送能力においてSCはECの1/2程度となる。中間型はこれらの諸元や性能値を比例配分によって与えたが、実車としての車体形状は必ずしも明確にイメージされている訳ではない。

図1はシミュレーションに用いたソーラー・チャレンジ・イン・北海道'93のコースを示す。スタートから周回コース入口までが4.15(km)あり、16.6

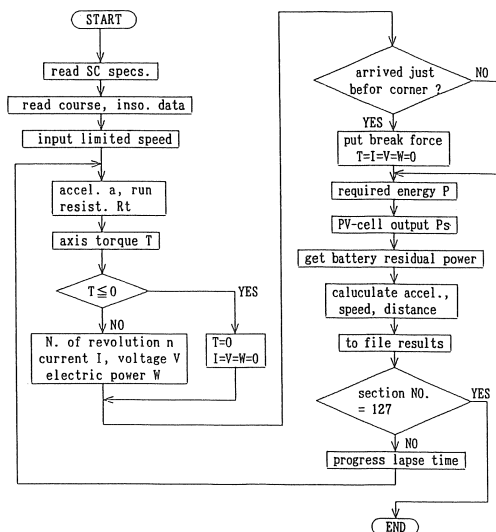


図2 シミュレーションフローチャート

6(km)の周回コースを回りスタート地点に戻る最大7(%)のより勾配を有する非常に起伏の富んだコースである。

シミュレーションはSCとECの諸元、日射量および127の区間に分けたコース・データをインプットして各区間におけるパネル発電量、速度、モータ端子間電圧、電機子電流、モータ軸トルク、供給エネルギー及び総効率を算出し、最後に走行時間、パネル依存率及び全供給エネルギーを求める。

図2はシミュレーションのフローチャートを示す。走行モードは最適な限界速度を設定し、その速度に達するまでアクセルを踏み込みモータへエネルギーを供給する。下り坂で走行速度が限界速度を超える場合アクセルを離してモータにエネルギーを印加しないで惰性走行する。各コーナでは速度を10(km/h)前後まで減速する。供給エネルギーはパネル出力での不足分をバッテリーによって補う。走行モードの最適化の第一近似としてはバッテリー容量のほぼ8割を使いきり、走行時間が最短になるように限界速度を決める。走行パターンはコースの周回数及び日射量を変え、タイプ1に限りパネル面積及びバッテリー容量を変え、日射量は北見工業大学で測定された過去15年間の6月の標準晴天日の午前10時の値⁽³⁾を用いる。日射パターンはその値の100(%) (快晴), 60(%) (晴れ), 30(%) (曇り), 0(%) (夜間)とする。

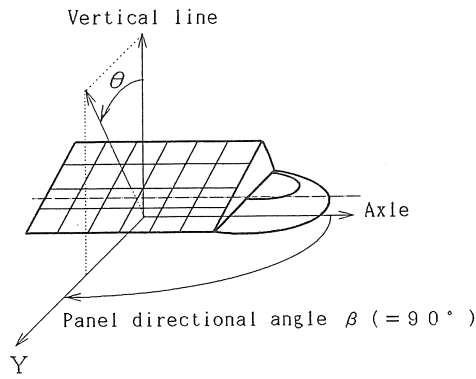


図3 ソーラーカーの軸とパネルの方向角(β)及び傾斜角(θ)

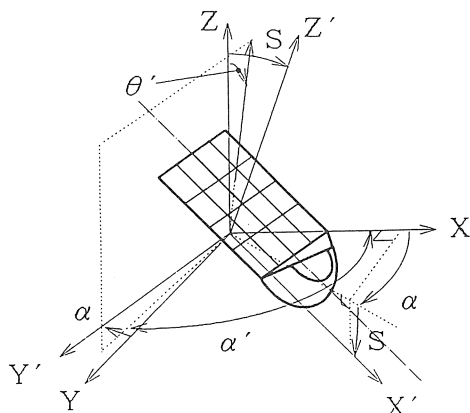


図4 進行方向と道路勾配に対するソーラーカーパネルの角度表示(θ', α')

3. パネル発電量の計算方法

パネルの発電量は日射データ、道路勾配及び方向をもとにSCのパネルに入射する傾斜面日射量を求め算出する。図3はSCの軸と進行方向から時計回りに測ったパネルの方向角β及びパネルの傾斜角θを示す。図4はSCが真南から西へαの方向でSの下り坂を走行しているときのSCパネルの角度関係を示す。パネルに入射する傾斜面日射量 I_P (W/m^2)は、SCパネルの水平面に対する角度を θ' ($^\circ$)、SCパネルの真南に対する方位角を α' ($^\circ$)とし、反射日射量を無視すると

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

ソーラー・パネルへの太陽光入射角 i ($^\circ$)は

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \theta' + \cosh \cdot \sin \theta' \cdot \cos(A - \alpha') \quad (2)$$

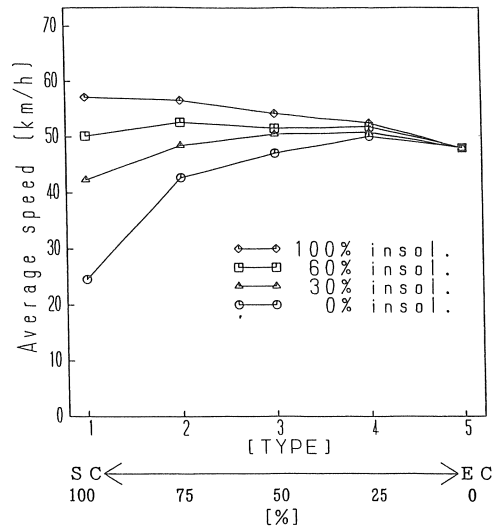


図5 各タイプの走行性能の比較

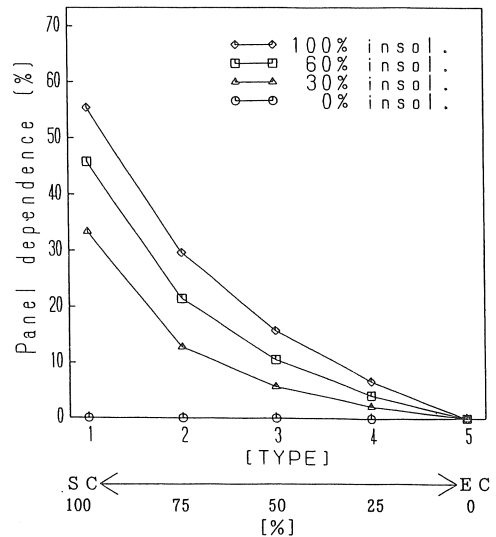


図6 各タイプのパネル依存率

となる。

ここで I_{HT} : 水平面全天日射量 (W/m^2)、 I_{ND} : 法線面直達日射量 (W/m^2)、 h : 太陽高度 ($^\circ$)、 A : 太陽方位角 ($^\circ$)。

したがって、パネルの発電量 G (W)はパネル面積を A_P (m^2)、パネル発電効率を η とすると式(3)となる。

$$G = I_P \cdot A_P \cdot \eta \quad (3)$$

4. シミュレーションの結果

図5及び表2はタイプ1のSCからタイプ5のEC

表2 各タイプの諸元と計算結果

	TYPE 1				TYPE 2				TYPE 3				TYPE 5			
car weight (kg)	250				340				425				600			
battery capacity (kWh)	1				2.25				3.25				6			
PV-cell module ratio (%)	100				75				50				0			
max. output (W)	1040				780				600				400			
insolation (%)	100	60	30	0	100	60	30	0	100	60	30	0	100	60	30	0
limited speed (km/h)	60.2	50.9	41	19	57.6	52.6	47.9	41	55	51.9	50.3	46.5	48.1	48.1	48.1	48.1
slope resist. Pc (kJ)	1162.29	1258.87	1301.57	1387.08	1715.76	1743.18	1753.31	1818.24	2085.21	2208.63	2219.47	2206.08	3014.13	3014.13	3014.13	3014.13
roll resist. Pr (kJ)	619.46	550.45	494.85	346.38	1008.3	959.44	929.13	846.84	1612.85	1541.31	1522.53	1487.64	3093.35	3093.35	3093.35	3093.35
wind resist. Pa (kJ)	1218.92	789.64	465.02	73.33	1668	1332.94	1074.27	721.33	2186.25	1863.99	1736.01	1453.45	2873.19	2873.19	2873.19	2873.19
acccl resist. P _g (kJ)	1379.08	832.53	581.39	78.73	1576.78	1301.74	1121.03	834.01	1926.9	1683.65	1470.08	1378.3	2120.56	2120.56	2120.56	2120.56
run resist. Pt (kJ)	4379.75	3531.48	2846.82	1885.53	5968.83	5337.29	4877.74	4220.42	7711.2	7297.56	6948.08	6526.07	11101.23	11101.23	11101.23	11101.23
power supply P (kJ)	6426.14	5313.57	4320.652	2871.21	9101.89	8115.86	7380.37	6338.57	11959.82	11265.56	10684.94	10048.04	17280	17280	17280	17280
Pt/P (%)	68.16	65.46	65.89	65.67	65.58	65.76	66.09	66.58	64.48	64.78	65.03	64.95	64.24	64.24	64.24	64.24
battery residual (kJ)	14.7	0	0	8.79	77.35	105.06	43.77	141.43	0	0	0	0	0	0	0	0
PV-cell depend. (%)	55.41	45.8	33.34	0	29.66	21.45	12.79	0	15.72	10.52	5.66	0	0	0	0	0
total. gener. power (kJ)	3561.6	2433.75	1440.68	0	2699.23	1740.92	944.14	0	1879.82	1185.58	604.96	0	0	0	0	0
effec. gener. power (kJ)	3561.6	2433.75	1440.68	0	2699.24	1740.92	944.14	0	1879.82	1185.58	604.94	0	0	0	0	0
running time	1' 18" 41	1' 29" 38	1' 45" 9	3' 3" 3	1' 19" 31	1' 25" 29	1' 32" 44	1' 45" 14	1' 23" 5	1' 27" 20	1' 29" 7	1' 35" 33	1' 33" 39	1' 33" 39	1' 33" 39	1' 33" 39
acccl. step time	54" 40	56" 31	1' 2" 3	1' 29" 49	53" 38	55" 29	58" 55	1' 2" 23	58" 8	58" 46	59" 38	1' 2" 55	1' 6" 59	1' 6" 59	1' 6" 59	1' 6" 59
average speed (km/h)	57.15	50.17	42.38	24.57	56.55	52.61	48.49	42.74	54.13	51.49	50.46	47.06	48.02	48.02	48.02	48.02

表3 タイプ1のパネル面積を変えたときの計算結果

	0				2				4				6				8			
PV-cell area (m ²)	0				2				4				6				8			
insolation (%)	100				100				100				100				100			
car weight (kg)	250				250				250				250				250			
battery capacity (kWh)	1				1				1				1				1			
convert. eff. (%)	17				17				17				17				17			
PV-cell module ratio (%)	0				25				50				75				100			
max. output (W)	0				340				680				1020				1320			
N. of circulation	2				3				4				5				6			
limited speed (km/h)	46.6	32.6	24.5	0	44.9	36.8	32	28.9	42.6	41.6	41	40.8	42.6	41.6	41	40.8	42.6	41.6	41	40.8
slope resist. Pc (kJ)	762.87	1028.68	1387.08	0	762.01	1024.25	1289.28	1611.25	765.61	1017.14	1298.44	1570.51	765.61	1017.14	1298.44	1570.51	765.61	1017.14	1298.44	1570.51
roll resist. Pr (kJ)	287.05	359.31	346.38	0	281.95	373.17	464.59	520.52	278.55	390.6	495.62	605.8	278.55	390.6	495.62	605.8	278.55	390.6	495.62	605.8
wind resist. Pa (kJ)	343.42	213.08	73.33	0	313.83	285.65	272.81	251.28	279.94	376.07	469.21	567.75	279.94	376.07	469.21	567.75	279.94	376.07	469.21	567.75
acccl. resist. P _g (kJ)	483.72	289.54	78.73	0	450.63	396.92	350.27	313.08	420.59	505.77	580.88	668.88	420.59	505.77	580.88	668.88	420.59	505.77	580.88	668.88
run resist. Pt (kJ)	1877.06	1890.6	1885.53	0	1808.43	2079.39	2376.95	2696.11	1744.69	2289.58	2844.15	3412.95	1744.69	2289.58	2844.15	3412.95	1744.69	2289.58	2844.15	3412.95
power supply P (kJ)	2874.29	2880	2871.21	0	2786.06	3173.94	3603.31	4054.64	2786.06	3173.94	3603.31	4054.64	2786.06	3173.94	3603.31	4054.64	2786.06	3173.94	3603.31	4054.64
Pt/P (%)	65.31	65.65	65.67	0	64.91	65.53	65.97	66.49	65.13	65.17	65.78	66.65	65.13	65.17	65.78	66.65	65.13	65.17	65.78	66.65
battery residual (kJ)	5.71	0	8.79	0	0	0	0	1.77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PV-cell depend. (%)	0	0	0	0	22.47	31.85	40.06	46.77	73.12	79.51	83.35	86.15	73.12	79.51	83.35	86.15	73.12	79.51	83.35	86.15
total. gener. power (kJ)	0	0	0	0	626.01	1013.94	1443.31	1896.43	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19
effec. gener. power (kJ)	0	0	0	0	626.01	1013.94	1443.31	1896.43	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19	1958.94	2793.55	3603.81	4479.19
running time	53" 46	1' 38" 45	3' 3" 3	0	55" 18	1' 29" 37	2' 7" 39	2' 47" 51	57" 41	1' 22" 18	1' 46" 12	2' 12" 1	57" 41	1' 22" 18	1' 46" 12	2' 12" 1	57" 41	1' 22" 18	1' 46" 12	2' 12" 1
acccl. step time	32" 34	56" 23	1' 29" 49	0	33" 5	51" 54	1' 19" 8	1' 29" 58	34" 20	48" 60	1' 2" 12	1' 17" 59	34" 20	48" 60	1' 2" 12	1' 17" 59	34" 20	48" 60	1' 2" 12	1' 17" 59
average speed (km/h)	46.45	35.42	24.57	0	45.16	39.02	35.23	32.74	43.3	42.49	42.34	41.64	43.3	42.49	42.34	41.64	43.3	42.49	42.34	41.64

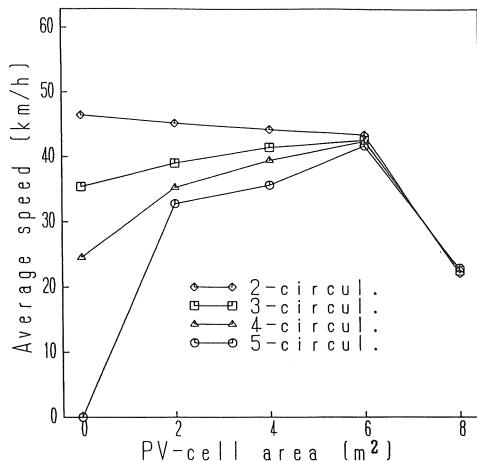


図7 タイプ1のパネル面積を変えたときの走行性能の比較

までが各日射パターンで周回コース4周(75.0km)を走行したときのシミュレーションの結果を示す。日射強度による平均速度の変動割合はタイプ1のSCが57(%)と最も高くタイプ2から3に移行するに従い低くなりタイプ5のECで0(%)となる。これはタイプ1のSCに近いほどパネル出力が増えバッテリー容量が減りパネル依存型のSCになるためである。従っ

て、走行距離が一定の場合、パネル依存型のSCは限界速度が日射量に大きく左右されるが、ECはそれが日射に関係なく一定となり安定した走行を得ることができる。

図6は上記のシミュレーションにおける各タイプのパネル依存率を示す。日射強度によるパネル依存率の変動の割合はタイプ5のECが0であり、タイプ1のSCに近づくにつれ高くなる。この傾向は平均速度の変動の割合とほぼ一致する。同じ日射条件で平均速度の最も速いタイプは日射量100(%)でタイプ1(57.15km/h)となり、日射量の減少とともにEC寄りに移行し日射量0(%)でタイプ4のSC(50.12km/h)となる。これからタイプ2のSCのバッテリーとパネルの組み合わせが日射量100(%)で最適となり、日射が弱くなるほどそれがバッテリーに依存したECへ移行することが分かる。従って、周回コース4周ではタイプ2及びタイプ3のSCが日射を有効に利用して走行し、また、日射がないときでも極端な速度の低下もなく安定な走行を行なうことができる。

つぎにタイプ1のSCのパネル面積及びバッテリー容量を変えて日射量100(%)で走行した場合のシミュレーション結果を図7及び表3に示す。この図の中でパネル面積0(m²)はバッテリー容量が1(kWh)のEC

であり、パネル面積、すなわち、パネル出力が増加するに従い、バッテリー容量は減少する。パネル面積 $8 \text{ (m}^2\text{)}$ は太陽電池出力が $1300 \text{ (W}_p\text{)}$ でバッテリー容量が 0 (Wh) となる。この図から周回数による平均速度の変動割合はパネル面積 $0 \text{ (m}^2\text{)}$ が $100 \text{ (\%)}$ と最も高くパネル面積の増加に伴い低くなり、パネル面積 $8 \text{ (m}^2\text{)}$ で $3.6 \text{ (\%)}$ となることが分かる。これは供給エネルギーがパネル面積の大きい SC ほどパネルに依存するためである。従って、パネル面積 $8 \text{ (m}^2\text{)}$ の SC は時間当たり供給可能なエネルギーが周回数が増えてもほとんど変わらず安定した速度で連続走行することが可能である。パネル面積 $8 \text{ (m}^2\text{)}$ の SC は平均速度のほぼ同じ他車より走行抵抗損失が約 2 倍大きく、総効率が 4 割ほど低い。これはバッテリーを持たない SC はパネルの出力がモータの定格出力の半分にも満たないときにトルク不足によって限界速度に中々到達することができず加速度抵抗が増加するためである。また、負荷率の低下によってモータ効率は極端に悪くなり総効率が低下する。これからバッテリーを適当に積みモータ出力を定格域に近づけた SC の方がパネルだけの SC より性能が向上し、少ないエネルギーで速く走行することができる。従って、パネル面積 $6 \text{ (m}^2\text{)}$ の SC は 8 m^2 の純 SC より約 $88 \text{ \%}$ も平均速度が速くなっている。

5. むすび

純 SC は安定した強い日射を確保できれば、一定の速度で連続走行が可能である。しかし、日射が弱くなるに従い走行速度が低下し日射 0 (W) で走行が不可能となる。このタイプの SC はバッテリーがないのでパネルの出力がモータの定格出力の半分にも満たないときにトルク不足によって限界速度に中々到達することが

できず加速度抵抗が増加する。また、モータ効率が負荷率の低下によって極端に悪くなり総効率が低下する。

純 EC は曇天及び日射のない夜間などでも走行が可能である。しかし、持ち出せるエネルギーが日射に関係なく決まるので好天でも走行距離に限界があり連続走行が不可能である。これらからバッテリー及びパネルを併用した SC の方が純 SC 及び純 EC よりも適切な走行ができることが分かる。その際、バッテリーの容量およびパネルの最大出力は走行コース、走行抵抗及び走行距離を考慮して決定される。

このようにソーラー・カーの設計に当たっては、車体重量、積載荷重、走行抵抗などの車両諸元、および高低差、路面状況など道路条件を想定して、満充電スタートのもとで晴天日及び曇天日の最大走行距離、平均速度などの走行性能を満足する太陽電池面積およびバッテリー容量が決定される。いずれにしてもより汎用性のあるソーラー・カーの実現にあたっては SC と EC の折衷型ではあるが、開発の初期段階としては走行性能のみでなく安全性の上からも EC 寄りの設計となると思われる。その際、特に高性能バッテリーの早期の開発とその実用化が必須条件である。

謝辞：本研究は平成 5 年度卒業の砂川浩二、坂田憲一両君の協力によった。

文献

- (1) 金山公夫・馬場弘・遠藤登・小関清寛・田中俊輔, ソーラー・チャレンジ・イン北海道'91におけるソーラー・カーの最適走行シミュレーション, 平成3年度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講演論文集(1991-9), 317-320, 北見。
- (2) 金山公夫・馬場弘・遠藤登, ソーラー・カーの性能と評価, 日本機械学会北海道支部第33回講演会講演要集(1992-9), 151-156, 札幌。
- (3) 竹花剛・馬場弘・金山公夫・遠藤登・齊藤正典, 北見市における日射データの整理, 日本機械学会北海道学生会第23回学生員卒業研究発表講演会講演要集(1994-3), 79-80, 北見。