

寒冷地における太陽光発電 システムの諸特性 (第2報)*

仲村 宏 一**
山城 迪**

(昭和60年4月30日受理)

The Characteristics of a Photovoltaic System in a Cold District. (Second Report)

by Koichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

Last year, we developed a measurement system which can measure solar radiation, the electric power of a solar cell, etc, by microcomputer, and showed the effectiveness of a photovoltaic system in a cold district by the data collected from a solar cell of 35 Wp output.

In this paper, we report

1. Comparison of the characteristics of a 480 Wp output solar cell which contains batteries with those of a 35 Wp output solar cell.
2. The characteristics of the solar cell for different resistance loads.
3. Studies of the security and the economy of a photovoltaic system as an independent power source and the suitable capacity of the battery using the operating data of the 480 Wp output solar cell.

1. ま え が き

前に筆者らは、マイクロコンピュータを用いた太陽光発電計測システムの紹介および、主に 35 Wp 太陽光発電システムから得られたデータより、寒冷地における太陽光発電システムの有効性を示した。今回は、バッテリーを含めた 480 Wp 太陽光発電システムの特性と 35 Wp 太陽光発電システムとの比較、そして異なった3種類の負荷抵抗値を接続した場合の太陽光発電システムの特性、さらに、480 Wp システムを使った独立電源としての太陽光発電システムの信頼性と経済性の検討およびバッテリーの最適設置容量の試算を行なった。

* 電気関係学会北海道支部連合大会において一部発表 (昭和59年9月)

** 北見工業大学電気工学科

2. システムの概要

本学の自然エネルギー実験施設 2号棟に、35 Wp および 480 Wp の 2 種類の太陽電池、バッテリー、インバーター、負荷、マイクロコンピューター、A/D コンバーターを設置し (1983 年)、昨年は 44 Wp 太陽電池を 3 台設置した。

(1) 太陽電池

図 1 に示す単結晶 35 Wp 太陽電池パネル (シャープ製)、多結晶 480 Wp 太陽電池パネル (京セラ製) および 44 Wp 多結晶太陽電池パネル (京セラ製) 3 枚を自然エネルギー実験室の屋上に仰角 45° で真南に向けて設置した。

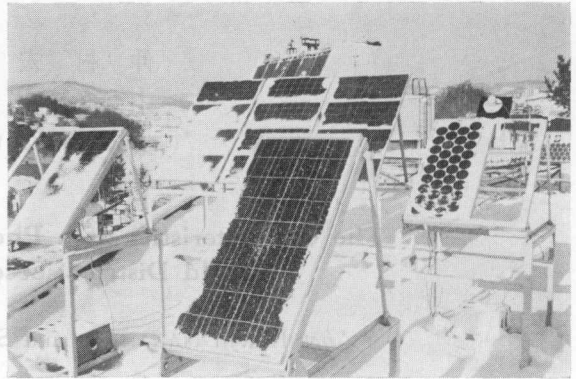


図 1 太陽電池 (44 Wp 多結晶, 35 Wp 単結晶, 480 Wp 多結晶) および日射計

(2) 日射計

ネオ日射計 (MS-42, 英弘精機製) を水平方向と太陽電池パネルと同方向に設置し、水平面

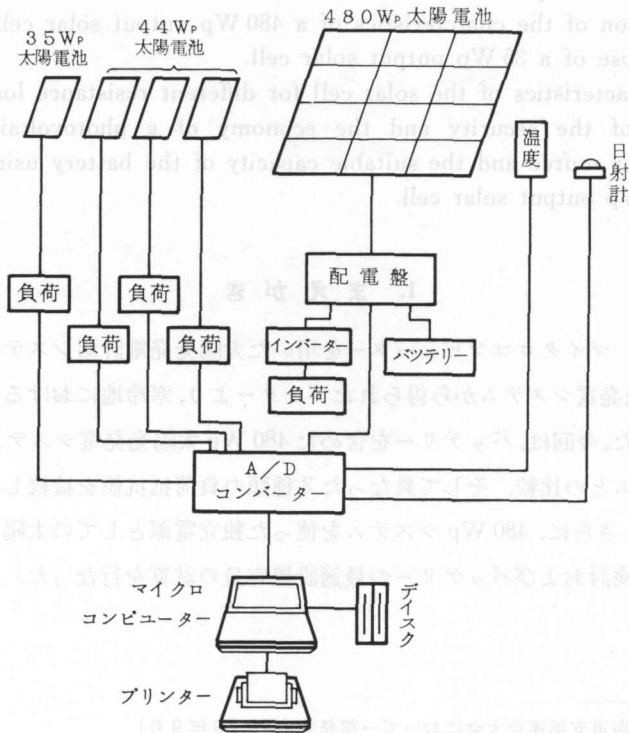


図 2 計測システム

全天日射と 45° 傾斜面全天日射を計測した (図1参照)。

(3) 負荷装置

35 Wp および 44 Wp 太陽電池には、スライド抵抗器 (横河北辰製) を用い、480 Wp 太陽電池はトランジスタインバーター (松永製) を通してランプ負荷に接続した。

(4) 計測システム

図2に計測システムの構成を示す。システムは主に、マイクロコンピュータ MZ-2000 (シャープ製) とその周辺機器、ディスク、プリンタおよび A/D コンバーター (TR 2723, タケダ理研製) で構成されている。計測プログラムは、大部分は BASIC でありマイクロコンピュータと A/D コンバーターは GP-IB システムで結ばれている。計測データは、日射量 (水平面全天日射, 45° 傾斜面全天日射), 温度 (太陽電池パネル裏面温度, 外気温), 電圧 (太陽電池電圧, バッテリー電圧, 負荷電圧), 電流 (太陽電池電流, バッテリー電流, 負荷電流), 電力 (太陽電池電力, バッテリー電力, 負荷電力), 各種積算値 (水平面全天日射量, 45° 傾斜面全天日射量, 各電力量) である。

3. 実験結果および考察

3-1. バッテリーを接続した 480 Wp 太陽電池出力特性と 35 Wp 太陽電池との比較

図3および表1は、1985年1月5日における計測結果で、温度 (パネル裏面温度および外気温), 日射 (水平面全天日射および 45° 傾斜面全天日射), 各種発電システムの効率, 電圧, 電流, 電力および電力量等の諸量を示している。これらの結果から次の考察が得られる。

(イ) 配電盤を通して負荷およびバッテリーに接続されている 480 Wp 発電システムの効率は、負荷だけを接続している 35 Wp 発電システムに比べて良く、特に日射強度の低い領域では、その差は大きくなっている。これは、電圧特性が 480 Wp システムではバッテリーによってほぼ一定に保たれるのに対して、35 Wp システムでは日射強度の変化によって大きく影響されることによる。

(ロ) 太陽光発電システムの効率は、1日の平均で 480 Wp システムが 9.34%, 35 Wp システムが 7.47% でほぼ 2% の差となっている。

(ハ) 太陽電池単位出力当りの1日の発生電力量は、480 Wp システムで 4.25 WH/W また、35 Wp システムで 3.72 WH/W である。

3-2. 480 Wp 太陽電池と 35 Wp 太陽電池の温度特性

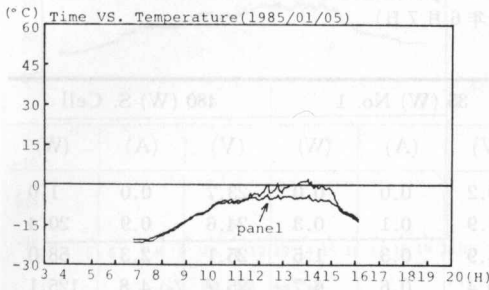
480 Wp 太陽電池と 35 Wp 太陽電池の温度特性を比較するため、図4および表2に示す1日の 45° 傾斜面全天日射量がほぼ同じ夏季 (1984年6月7日, 日射量 4.388 kWh/m²日) と冬季 (1985年1月5日, 日射量 4.335 kWh/m²日) の計測結果から次の考察が得られる。

表1 480 W_p, 35 W_p および 44 W_p 太陽光発電の諸特性 (1985年1月5日)

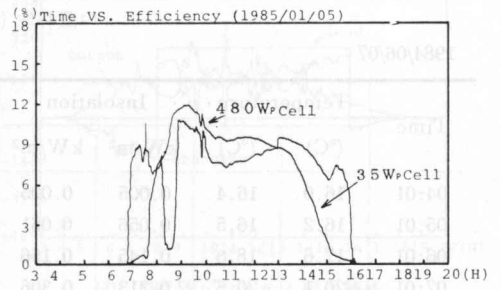
1985/01/05

Time	Temperature		Insolation		35 (W) No. 1			480 (W) S. Cell			480 (W) Battery			
	(°C)	(°C)	kW/m ²	kW/m ²	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	
07:00	-21.6	-20.7	0.005	0.001	0.3	0.0	0.0	26.1	0.1	1.5	25.6	0.0	-1.0	
08:00	-20.8	-20.0	0.126	0.060	4.5	0.3	2.3	27.1	1.7	47.6	26.4	-1.7	-45.7	
09:00	-16.7	-16.0	0.453	0.222	11.8	0.7	9.6	30.3	7.3	222.8	29.5	-7.2	-215.5	
10:00	-11.2	-10.8	0.580	0.328	19.8	1.2	23.4	32.2	10.4	334.5	31.4	-10.0	-315.3	
11:00	-7.0	-6.4	0.800	0.459	20.4	1.2	24.7	30.3	12.6	383.1	29.5	-3.5	-104.5	
12:00	-5.0	-5.4	0.798	0.453	20.4	1.2	24.9	30.4	12.4	377.7	29.6	-3.3	-96.4	
13:00	-2.1	-4.8	0.688	0.408	19.8	1.2	23.3	29.2	10.8	314.3	28.4	-1.6	-45.3	
14:00	0.2	-4.7	0.506	0.311	16.6	1.0	16.5	31.8	7.4	235.7	31.0	-7.4	-228.5	
15:00	-0.3	-5.5	0.275	0.178	9.0	0.5	5.2	30.5	3.6	110.3	29.8	-3.6	-106.6	
16:00	-8.8	-9.3	0.039	0.027	1.3	0.1	0.2	27.8	0.5	13.0	27.2	-0.4	-12.2	
Max	2.1	0.0	0.846	0.471	20.7	1.2	25.4	32.5	12.9	393.1	31.7	0.0	0.6	
備考	外気	パネル	45°	水平								一は充電		

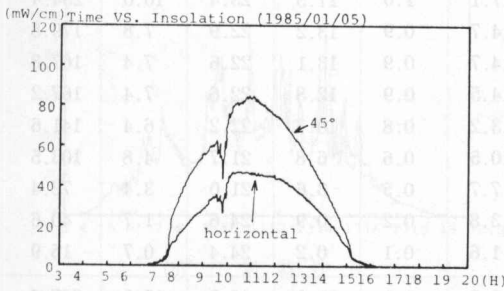
Time	480 (W) Load			480 (W) Inverter			44 (W) No. 1			44 (W) No. 2			44 (W) No. 3		
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
07:00	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
08:00	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	2.9	0.3	1.7	3.6	0.3	2.3	6.1	0.3	3.8
09:00	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	11.3	1.0	12.0	14.5	1.3	19.8	20.2	1.3	27.5
10:00	0.8	0.8	7.3	6.1	0.0	3.3	14.8	1.1	15.8	18.2	1.7	30.4	20.7	1.8	36.5
11:00	24.0	24.0	214.8	100.0	1.0	99.1	17.3	1.1	18.4	19.0	1.7	33.2	20.6	2.1	42.6
12:00	24.1	24.1	216.6	100.0	1.0	99.3	17.0	1.1	18.0	18.9	1.7	32.7	20.4	2.0	41.6
13:00	24.1	24.1	217.2	100.1	1.0	99.4	14.8	1.0	15.5	17.5	1.6	28.2	20.3	1.8	35.9
14:00	1.0	1.0	0.0	5.8	0.0	0.0	10.5	1.0	10.3	12.4	1.1	14.5	18.9	1.2	23.8
15:00	0.2	0.2	0.0	5.8	0.0	0.0	5.1	0.5	3.0	5.7	0.5	3.3	10.5	0.6	7.0
16:00	0.1	0.1	0.0	6.7	0.0	0.0	0.6	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	1.5	0.1	0.2
Max	24.1	9.1	217.7	100.1	1.0	99.4	17.5	1.1	18.7	19.2	1.8	33.8	21.0	2.1	43.1
備考							R=18.9Ω			R=11.5Ω			R=8.5Ω		



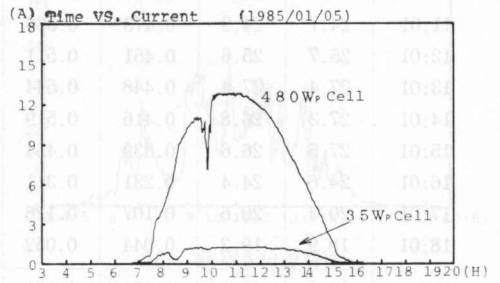
(a) 温度特性



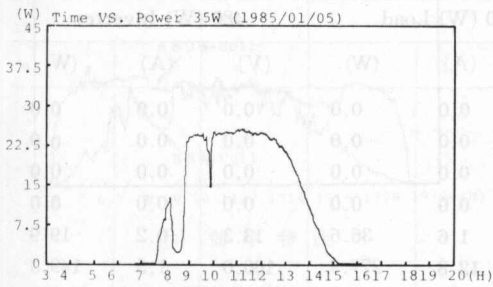
(e) 効率特性



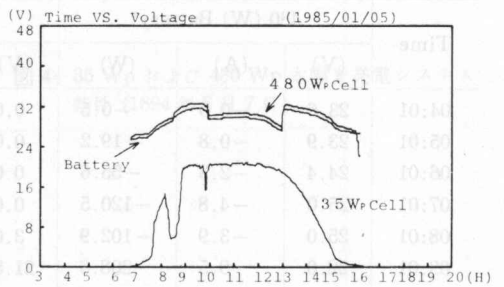
(b) 日射特性



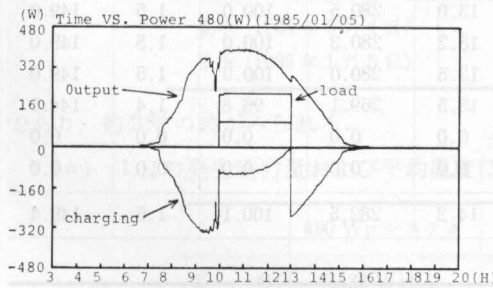
(f) 電流特性



(c) 35 Wp 出力特性



(g) 電圧特性



(d) 480 Wp システム出力特性

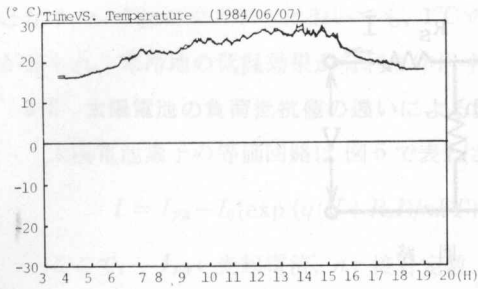
図3 35 Wp および 480 Wp 太陽光発電システム特性 (1985年1月5日)

表2 480 W_p および 35 W_p 太陽光発電
の諸特性 (1984年6月7日)

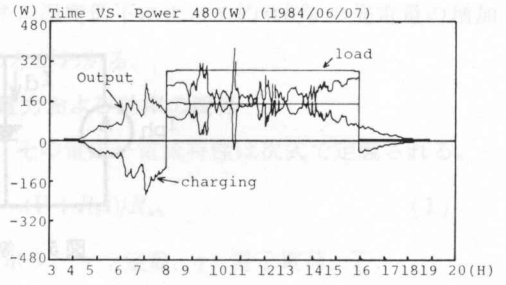
1984/06/07

Time	Temperature		Insolation		35 (W) No. 1			480 (W) S. Cell		
	(°C)	(°C)	kW/m ²	kW/m ²	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
04:01	16.0	16.4	0.005	0.005	0.2	0.0	0.0	23.7	0.0	1.0
05:01	16.2	16.5	0.056	0.061	1.9	0.1	0.3	24.6	0.9	20.4
06:01	17.6	18.0	0.145	0.156	4.9	0.3	1.5	25.1	2.3	58.0
07:01	20.1	20.5	0.313	0.306	10.4	0.6	6.7	25.7	4.8	125.1
08:01	22.2	22.6	0.365	0.373	12.2	0.7	9.1	25.7	5.8	149.4
09:01	22.2	22.4	0.289	0.316	9.9	0.6	6.3	22.8	4.7	106.8
10:01	24.2	24.8	0.607	0.620	17.1	1.0	17.5	23.4	10.0	234.4
11:01	24.7	24.9	0.473	0.530	14.7	0.9	13.2	22.9	7.8	179.8
12:01	25.7	25.6	0.451	0.511	14.7	0.9	13.1	22.6	7.4	167.8
13:01	27.4	27.4	0.448	0.544	14.5	0.9	12.8	22.6	7.4	167.2
14:01	27.3	26.8	0.416	0.519	13.2	0.8	10.7	22.2	6.4	141.6
15:01	27.5	26.6	0.339	0.454	10.5	0.6	6.8	21.7	4.8	103.5
16:01	24.6	24.4	0.231	0.311	7.7	0.5	3.6	21.0	3.4	72.4
17:01	20.4	20.6	0.107	0.126	3.8	0.2	0.9	24.6	1.7	40.6
18:01	18.9	19.2	0.044	0.052	1.6	0.1	0.2	24.4	0.7	15.9
Max	30.1	28.1	0.879	0.960	18.8	1.1	21.0	26.5	15.0	367.6
備考	外気	パネル	45°	水平						

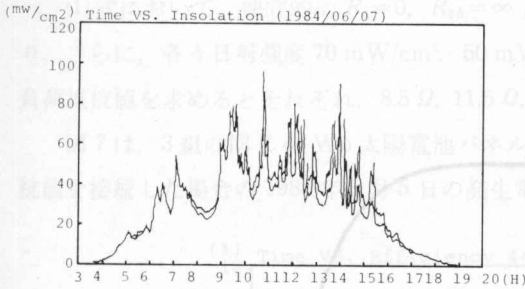
Time	480 (W) Battery			480 (W) Load			480 (W) Inverter		
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
04:01	23.6	-0.0	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
05:01	23.9	-0.8	-19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
06:01	24.4	-2.3	-55.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
07:01	25.0	-4.8	-120.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
08:01	25.0	-3.9	-102.9	3.0	1.6	36.6	13.3	0.2	19.9
09:01	22.0	9.5	208.6	21.8	12.8	277.9	100.0	1.5	149.3
10:01	22.7	4.0	89.2	22.4	12.5	280.5	100.0	1.5	149.2
11:01	22.1	6.4	140.7	21.8	12.8	280.3	100.0	1.5	149.1
12:01	21.9	7.0	152.2	21.6	13.0	280.3	100.0	1.5	149.0
13:01	21.6	7.0	152.9	21.5	13.0	280.5	100.0	1.5	149.0
14:01	21.5	8.3	176.8	21.2	13.2	280.3	100.0	1.5	149.0
15:01	21.0	10.1	212.6	20.7	13.5	280.0	100.0	1.5	149.0
16:01	20.3	11.4	229.5	19.4	13.5	269.1	96.8	1.4	144.1
17:01	23.9	-1.6	-38.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18:01	23.8	-0.6	-14.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Max	25.7	13.1	256.7	23.4	14.2	282.5	100.1	1.5	149.4
備考	-は充電								



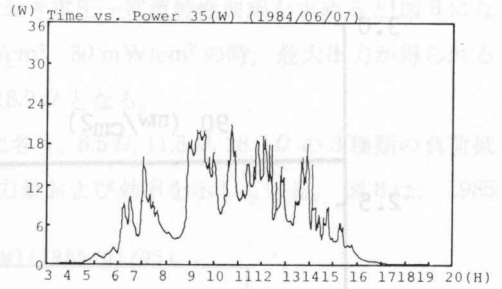
(a) 温度特性



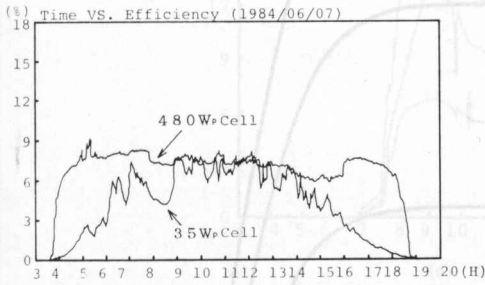
(d) 480 W_p システム出力特性



(b) 日射特性



(e) 35 W_p 出力特性



(c) 効率特性

図4 35 W_p および 480 W_p 太陽光発電システム特性 (1984年6月7日)

(イ) 1日の平均効率は、

	480 W _p システム	35 W _p システム
夏季 (1984年6月4日)	7.17%	5.80%
冬季 (1985年1月5日)	9.34%	7.47%

であり、約2%の差がみられる。

(ロ) 1日の発生電力量および平均温度は、

	480 W _p システム	35 W _p システム	パネル裏面温度
夏季	1586 WH/日	102 WH/日	22.5°C
冬季	2040 WH/日	130 WH/日	-10.2°C

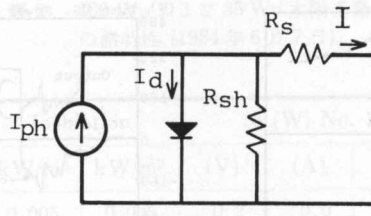


図5 等価回路

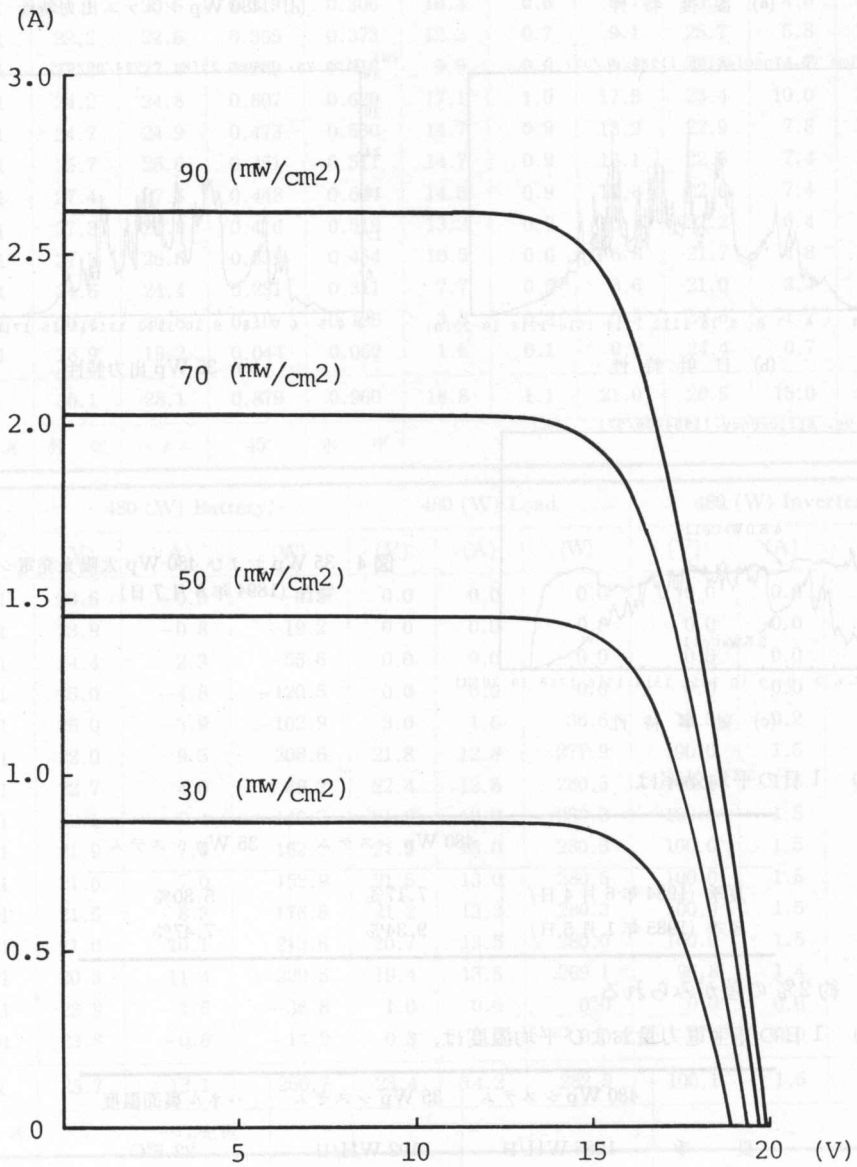


図6 太陽電池 (電圧—電流) 特性

となり、いずれのシステムにおいても、1°Cのパネル温度低下によって約0.8%の発電量の増加が見られ、寒冷地の低温効果が有利に作用することがわかる。

3-3 太陽電池の負荷抵抗値の違いによる発生電力および効率の関係

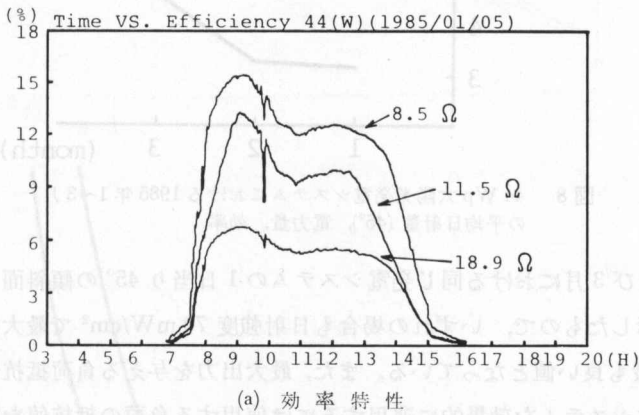
太陽電池素子の等価回路は図5で表わされ、その電圧—電流特性は次式で定義される。

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp \{q(V + R_s I) / nkT\} - 1] - (V + R_s I) / R_{sh} \quad (1)$$

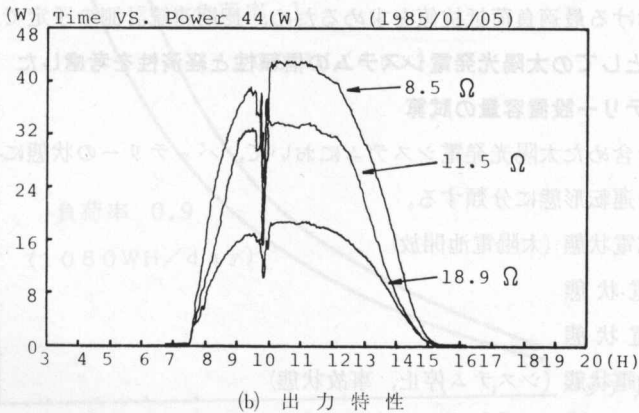
ここで、 I_{ph} : 光起電流, n : 接合定数, k : ボルツマン定数, q : 電子電荷, T : 絶対温度, I_0 : ダイオード飽和電流, R_s : 直列抵抗, R_{sh} : 並列抵抗

(1)式において、便宜的に $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$ とおき電圧—電流特性曲線を求めると図6になり、さらに、各々日射強度 70 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 , 30 mW/cm^2 の時、最大出力が得られる負荷抵抗値を求めるとそれぞれ、 8.5Ω , 11.5Ω , 18.9Ω となる。

図7は、3組の同じ 44 W_p 太陽電池パネルに各々、 8.5Ω , 11.5Ω , 18.9Ω の3種類の負荷抵抗値を接続した場合の1985年1月5日の発生電力量および効率を示している。図8は、1985



(a) 効率特性



(b) 出力特性

図7 44 W_p 太陽光発電システムの出力量および効率特性 (負荷抵抗値 8.5Ω , 11.5Ω , 18.9Ω の時, 1985年1月5日)

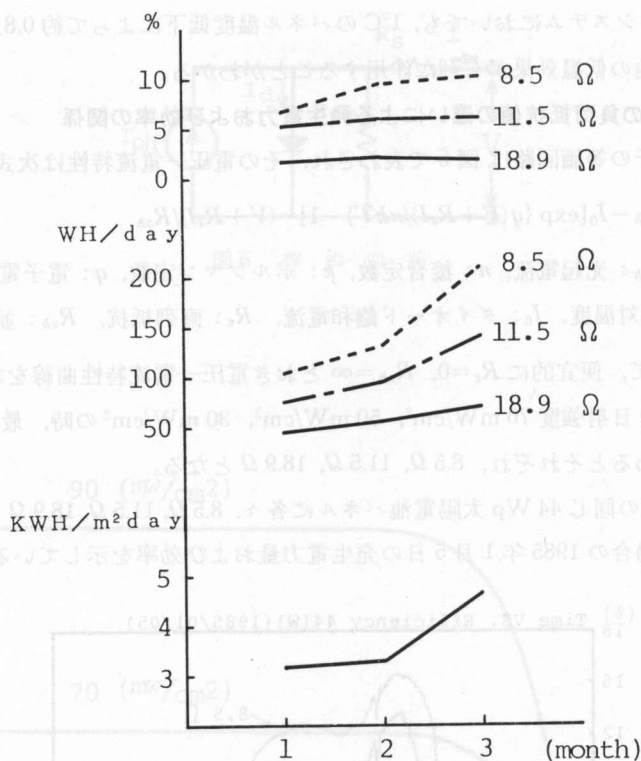


図8 44 Wp太陽光発電システムにおける1985年1~3月の平均日射量(45°), 電力量, 効率

年1月, 2月および3月における同じ発電システムの1日当り45°の傾斜面日射量と発生電力量および効率を示したもので, いずれの場合も日射強度70 mW/cm²で最大出力となる抵抗値(8.5 Ω)の場合に最も良い値となっている。また, 最大出力を与える負荷抵抗値は日射により変化する, 発電システムを効果的に運用するには使用する負荷の抵抗値を検討する必要がある, 北見地方における最適負荷抵抗値を求めるため, 長期連続計測の予定である。

3-4 独立電源としての太陽光発電システムの信頼性と経済性を考慮した

最適バッテリー設置容量の試算

バッテリーを含めた太陽光発電システムにおいて, バッテリーの状態によって, そのシステムを次の4つの運転形態に分類する。

1. 過充電状態 (太陽電池開放)
2. 充電状態
3. 放電状態
4. 過放電状態 (システム停止, 事故状態)

添字によって上記の状態を示すものとする, システムの状態確率ベクトル π は,

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (2)$$

となる。次に、4つの状態間の推移確率行列 P を次式で定義すると、

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix} \quad (3)$$

マルコフ過程の極限状態確率の算定式を用いて、太陽光発電システムの事故状態確率 π_4 は、次の連立方程式から求めることができる。

$$\pi \cdot P = \pi, \quad \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1$$

これらの式を使って、1985年1月および2月の480 Wp 発電システムの計測データから、バッテリー設置容量と事故状態確率との関係を表わしたのが図9である。また、図10はシステムが事故状態(停止)にならないために必要な最少バッテリー容量と負荷の関係を表わしたもので、これよりシステムの構成容量が決定できる。たとえば、信頼性の立場から無停電のシステムを構成するために必要なバッテリー容量は、1日の負荷が1,200 WHの時、負荷の21日

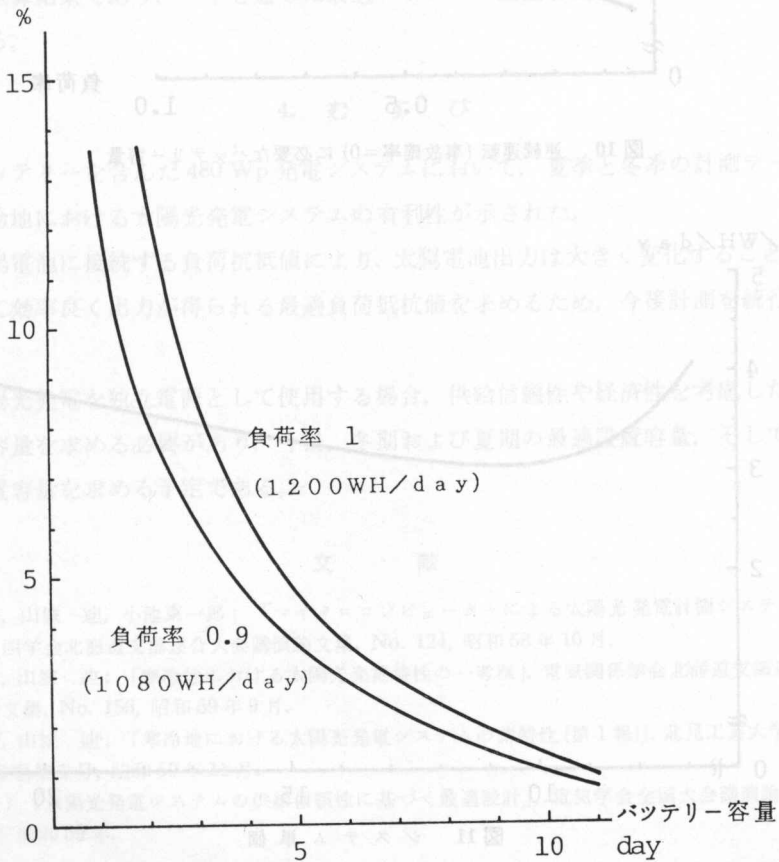


図9 事故状態確率 (π_4)

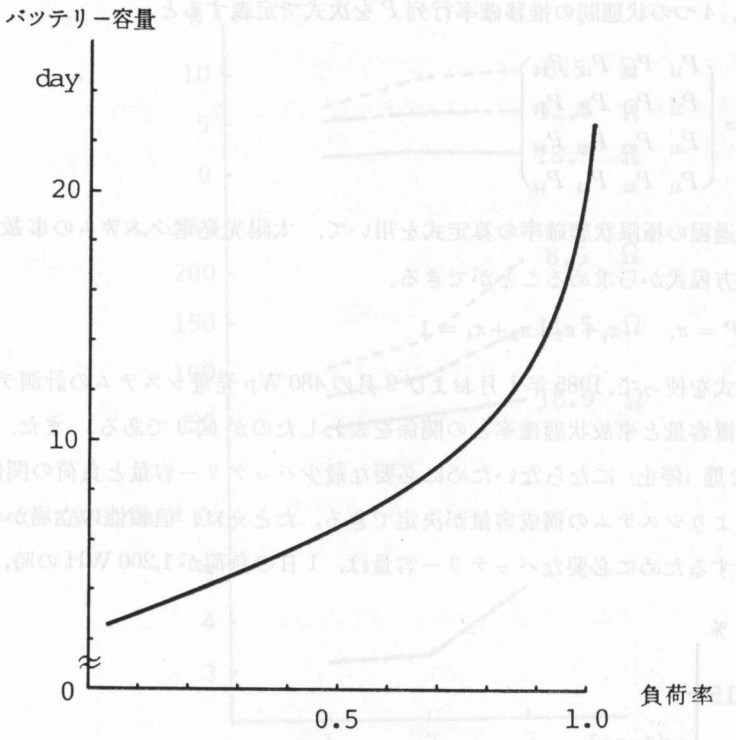


図10 連続運転(事故確率=0)に必要なバッテリー容量

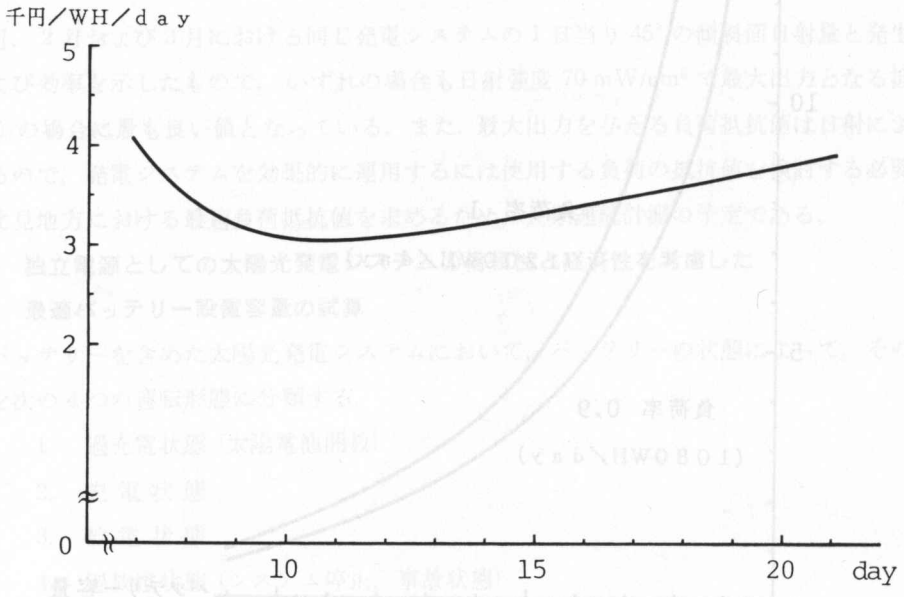


図11 システム単価

分、負荷が600 WHの時は、負荷の8日分あればよい。

次に、太陽電池とバッテリーを含めたシステム単価 C (円/WH/日) は、次式より与えられる。

$$C = a_s \cdot K_s \cdot \frac{86}{q} \cdot \frac{1}{K} + a_B \cdot K_B \cdot D \quad (5)$$

ここで、 a_s : 太陽電池 (架台込み) 単価 (円/Wp), K_s : 温度補正, 損失等の係数 (1.86), q : 1日の平均受光エネルギー (cal/cm²/日), a_B : バッテリー (架台込み) 単価 (円/WH), K_B : 充放電効率, 利用率等の係数 (2.95), K : 負荷率, D : バッテリー設置容量 (日)

いま、 $a_s=2,500$ 円, $a_B=40$ 円として図10の関係を用いて、(5)式を計算すると図11が得られる。

図11より、経済性の面から北見地方における最適バッテリー設置容量は負荷の10~11日分となることがわかる。しかし、これは降雪等の気象条件の悪い1985年1月および2月のデータからの試算結果であり、一年を通した最適バッテリー設置容量は、より少ない値になるものと思われる。

4. む す び

(1) バッテリーを含んだ480 Wp 発電システムにおいて、夏季と冬季の計測データの比較から、寒冷地における太陽光発電システムの有利性が示された。

(2) 太陽電池に接続する負荷抵抗値により、太陽電池出力は大きく変化することが示され、年間を通じて効率良く出力が得られる最適負荷抵抗値を求めため、今後計測を続行する予定である。

(3) 太陽光発電を独立電源として使用する場合、供給信頼性や経済性を考慮した最適バッテリー設置容量を求めめる必要があり、今後、冬期および夏期の最適設置容量、そして年間を通した最適設置容量を求めめる予定である。

文 献

- 1) 仲村宏一, 山城 迪, 小池東一郎: 「マイクロコンピュータによる太陽光発電計測システムの開発」, 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, No. 124, 昭和58年10月.
- 2) 仲村宏一, 山城 迪: 「寒冷地における太陽光発電特性の一考察」, 電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集, No. 156, 昭和59年9月.
- 3) 仲村宏一, 山城 迪: 「寒冷地における太陽光発電システムの諸特性(第1報)」, 北見工業大学研究報告, 第16巻第1号, 昭和59年11月.
- 4) 熊野昌義: 「太陽光発電システムの供給信頼性に基づく最適設計」, 電気学会全国大会講演論文集, No. 1102, 昭和59年.