

## 2/ 太陽電池の運用について

給電部 通信課

### 1. はしがき

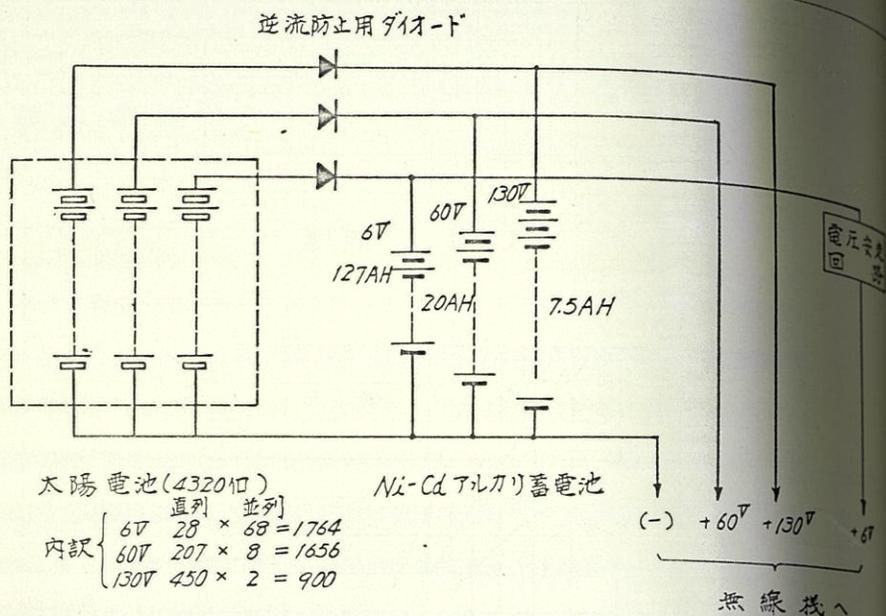
当社は太陽エネルギーの利用開発研究の一環として太陽電池の実用化を図るため、昭和32年より日本電気株式会社と共同研究を続けてきた結果、昭和33年11月、福島市信夫山々頂に太陽電池電源とする超短波無線中継所を設置した<sup>1)</sup>。太陽電池は直径約28mmの素子4,320個で構成され、その出力によつてNi-Cdアルカリ蓄電池を浮動充電させるもので、快晴時における出力は設計値50Wを約30%上廻る66Wを得るといふ、好成績を収めて試験を完了し、正式に運用を開始したものである。

信夫山太陽電池実用化の成功を見るに及び、海上保安庁では昭和34年11月広島県篠瀬に無人灯電源として、電源開発株式会社では昭和35年3月高知県三辻ヶ森に超短波無線機電源として<sup>2)</sup>それぞれ太陽電池を設置し今後続々と施設される機運にある。

太陽電池に関する電子工学的な研究結果は既に数多く発表されているが<sup>3)</sup>、実用上重要と考える電源として、使用した場合の長期間運用特性の研究例は見当らないようである。そこでわれわれはその第1段階として信夫山太陽電池の約2年に亘る運用結果を中心に、晴天時における電池面の照度の時間的変化特性、アルカリ蓄電池充電特性、等価日照時間、最適負荷抵抗等について、理論的な解析を行い、電源としての太陽電池の設計上参考となる結果を得たので、以てこれを挙げて、その概要を記述する。

### 2. 太陽電池の構成とその出力実測値

太陽電池の構成は直径約28mmの素子9個を1ブロックとし、アクリル樹脂内にモールドし、このブロック480個を2m×2.5mの鉄平面枠に取付けたものである。太陽電池の総数は4,320個で、これを第1図に示すように、負荷に応じて適当に組合せ逆流用防止ダイオード、Ni-Cdアルカリ蓄電池を浮動充電させている。最大出力（快晴時で照度約1.2 lux）における出力を川崎市日本電気工場と信夫山において実測した結果を第1表に示す。



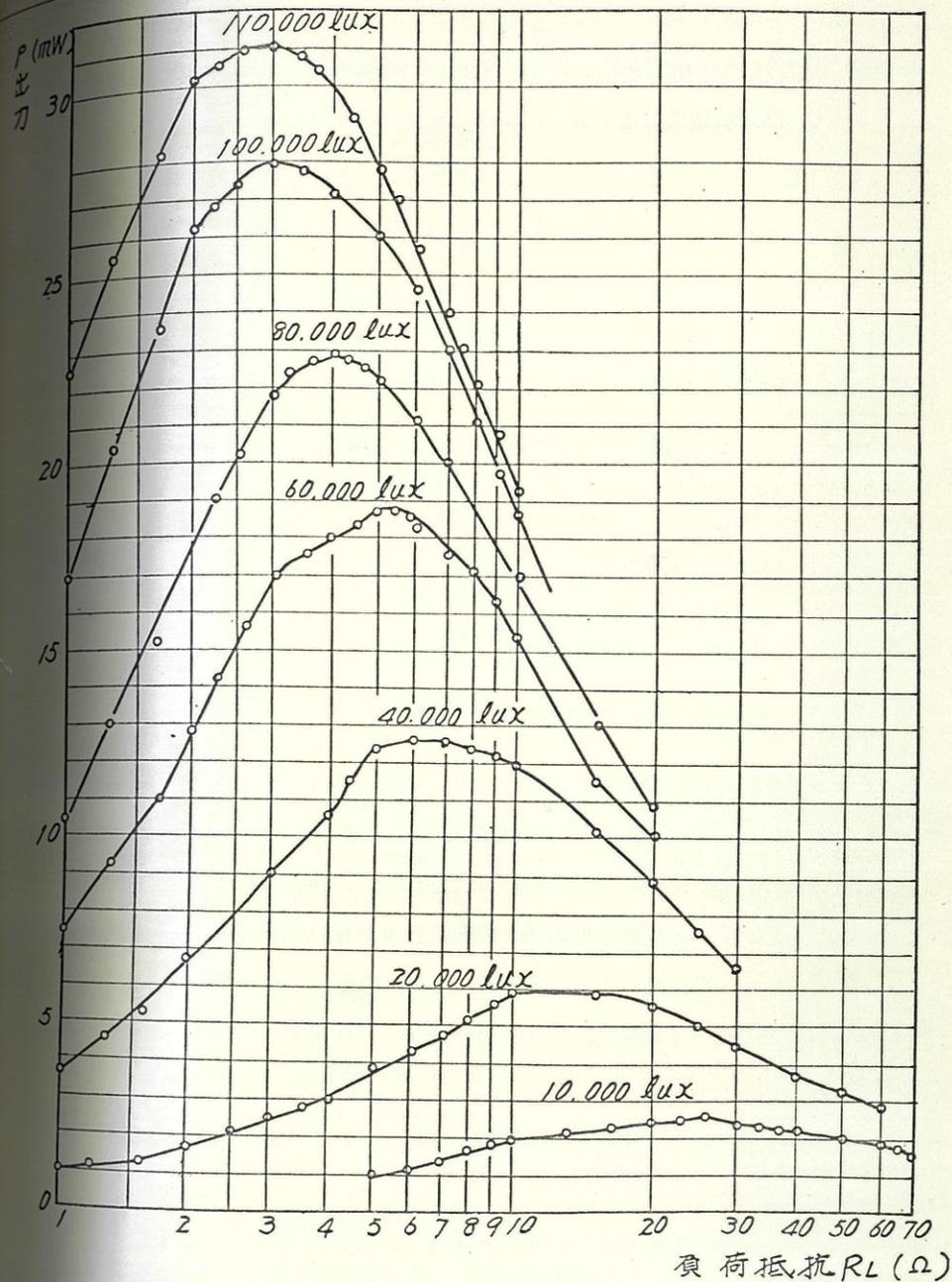
第1図 信夫山太陽電池の構成

第1表 信夫山太陽電池の最大出力

回路別	項目	太陽電池 素子数	昭33.10.27 川崎		昭33.11.5. 信夫山	
			最大出力	1個当り平均出力	最大出力	1個当り平均出力
6.5V		1,764	19.8W	11.2mW	24.7W	14.0mW
60V		1,656	23.6	14.2	24.7	14.9
130V		900	14.4	16.0	17.3	19.3
合計又は平均		4,320	57.8	13.8	66.3	16.1

第1表によつて判明するように信夫山における出力は当初設計値を約30%上廻る66Wとされた。また川崎と信夫山における出力の差から大気中の塵埃による光の散乱・吸収の程度が電池出力に相当影響することも判明した。

一般に太陽電池出力は照度、負荷抵抗温度の函数である<sup>4)</sup>。この中で出力-照度・負荷特性として、電源開発会社三辻ヶ森太陽電池の実測値<sup>2)</sup>を第2図に示す。図より負荷抵抗が約5Ω以下で一定の場合並びに負荷抵抗を照度に対応して出力最大となるように負荷抵抗を変化させた場合の太陽電池出力は照度にほぼ比例している。温度-出力特性は温度1°C上昇する毎に出力が0.5%減少するが、信夫山ではあまり問題になつていない。

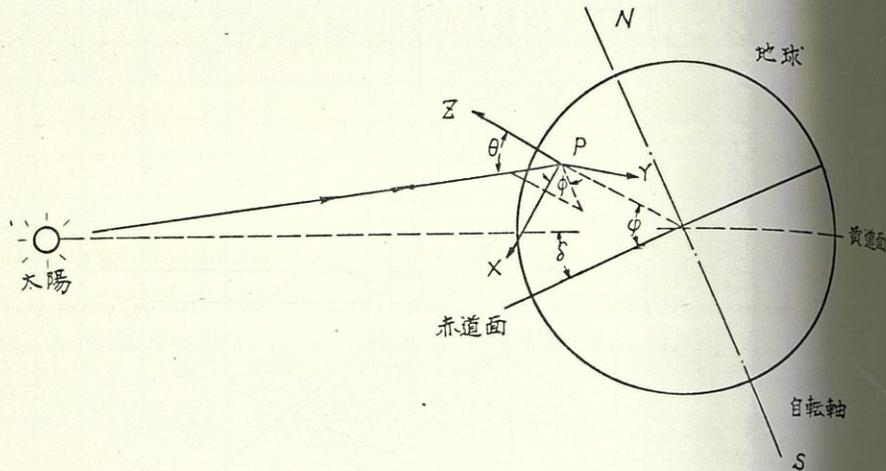


第2図 太陽電池照度特性の一例

### 3. 晴天時における太陽電池照度(日射量)の時間的变化

地球上任意の地点において真南を向き、且つ鉛直線方向に任意に傾けて設置された太陽電池表面の晴天時照度の時間的变化を解析する。周知のように地球の公転軌道は太陽を1つの焦点とす

る離心率  $\nu = 0.017$  の楕円であるが、 $\nu \ll 1$  なので  $\nu = 0$  の円軌道と仮定する。第3図に示すような太陽と地球を示す座標系において、南中時を時間原点とした場合の任意時刻  $t$  における太陽方向  $(\theta, \phi)$  は解析幾何的な取扱いにより次式で表示される。



第3図 太陽と地球の相対位置略図

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \frac{\pi}{12} t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sin \theta \sin \phi = \cos \delta \sin \frac{\pi}{12} t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\cot \phi = \sin \varphi \cos \frac{\pi}{12} t - \cos \varphi \tan \delta \operatorname{cosec} \frac{\pi}{12} t \quad \dots\dots\dots (3)$$

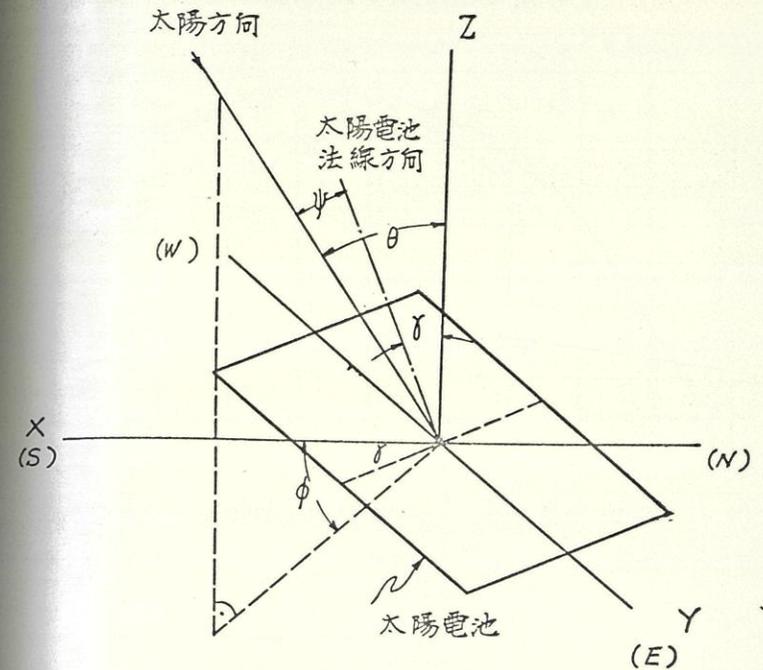
こゝで  $\varphi$  は緯度、 $\delta$  は赤道面と黄道面とのなす角で赤緯、 $t$  は南中時を0とし午前中を+午後-符号を付してそれぞれ表わすものとする。なお、時差はこれを無視した。赤緯  $\delta$  は季節によって変化するもので春分→夏至→秋分→冬至→春分につれて  $\delta$  は  $0^\circ \rightarrow 23.5^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow -23.5^\circ \rightarrow 0^\circ$  如く変化する。

次に第4図に示すように太陽電池法線を鉛直面内で  $\gamma$  だけ傾けた場合、時刻  $t$  における太陽線の入射角  $\psi$  は

$$\cos \psi = \sin \theta \cos \phi \sin \gamma + \cos \theta \cos \gamma \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。従つて  $\psi = 0$  のときの照度を  $L_0$  とすれば、時刻  $t$  における照度  $L$  は (1)~(4)より式で表わされる。

$$L = L_0 \cos \psi = \sin \gamma \left( \sin \varphi \cos \delta \cos \frac{\pi}{12} t - \sin \delta \overset{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right) + \cos \gamma \left( \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \frac{\pi}{12} t \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$



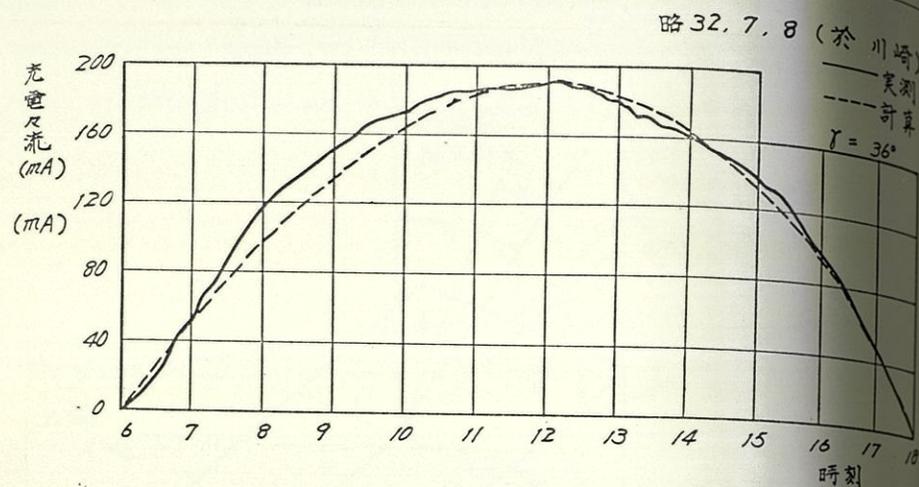
第4図 太陽電池の取附角度

(5) は晴天時太陽電池表面照度を示す一般式であり、これを時間  $t$  について積分したものはその時間内における太陽放射エネルギー、即ち太陽電池発生電力量を示すので電池面の据付角度  $\gamma$  の決定等に際し極めて有用なものである。信夫山における如く春・秋分の南中高度に垂直となるように太陽電池面を据付けた場合には  $\gamma = \varphi$  となつて (5) は簡単に

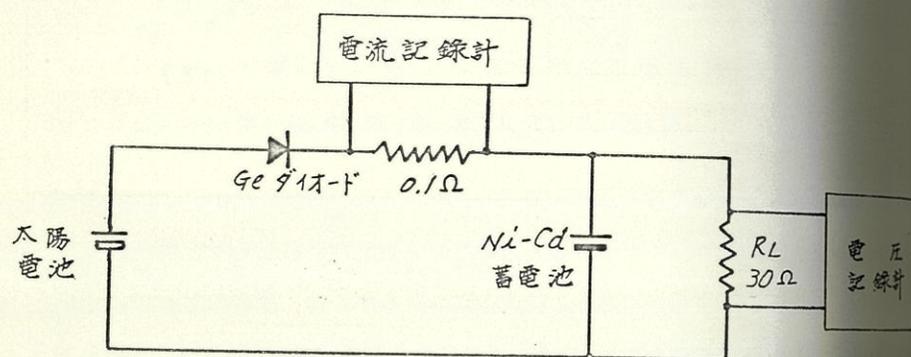
$$L' = L_0 \cos \delta \cos \frac{\pi}{12} t \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。(6) は春分より秋分までの期間、毎日午前6時から午後6時まで照度が余弦的に変化することを示している。信夫山 ( $\varphi = 37^\circ 45'$ ) において夏至 ( $\delta = 23.5^\circ$ ) では午前6時、午後6時の  $\theta$  は (1) より  $\theta = \varphi - \delta = 14^\circ 15'$  となつて水平面照度は  $0.2462 L_0$  であるにもかかわらず、太陽電池を  $\gamma$  だけ傾けたら電池面照度は0となる。

以上の理論が実験と一致することを示すため、太陽電池によるアルカリ蓄電池の浮動充電々流時間特性の実測値と (6) の計算結果を併せ第5図に示す。これは第6図の回路によつて、昭和32.7.28 (晴天) 川崎市において実測した充電々流の時間変化特性であり、アルカリ蓄電池が過充電状態でない限り充電々流は照度に比例するので充電々流の変化を以つて照度変化とみなして差支えない。第5図によつて明らかなように計算と実測とは極めてよく一致している。



第5図 太陽電池によるアルカリ蓄電池浮動充電電流の時間的変化



第6図 太陽電池によるアルカリ蓄電池の浮動充電測定回路

4. 晴天時における等価日照時間とその長期間平均値

照度  $L$  が (6) に従って変化する場合、午前6時～午後6時の全放射エネルギーが南中時の度の何時間分に相当しているかを等価日照時間  $T_e$  と定義すれば、これは (6) より

$$T_e = \frac{1}{L_0 \cos \delta} \int_{-6}^6 L' dt = \frac{24}{\pi} \rightarrow 7 \text{時間 } 38 \text{分} \dots\dots\dots (7)$$

となる。しかし1年中には曇天、雨天もあるので長期間の平均値が問題となる。そこで太陽電池の短絡電流が日射量に比例することを利用し、それを 25 AH 積算電量計によって長期間測定した結果より平均日照時間を求めたものを第2表に示す。更に第2表には気象台<sup>5)</sup>で測定した日照時数 (1901~1955年55カ年間の平均値) をも併せ示してある。

第2表 信夫山における日照時間の長期間測定

測定期間	日数	短絡電流積算値	1日当り短絡電流積算値	(66W相当) 1日当りの等価日照時間	1日当りの平年日照時数	備考
		AH	mAH	H	H	
34. 5.13~6.4	22	5.4	245	3.77	6.55	66W相当の短絡電流 65mA
6.4~6.15	11	3.0	272	4.20	5.86	
6.15~7.13	28	5.0	179	2.86	4.80	
7.13~8.3	21	5.3	252	3.86	5.75	
8.3~9.19	47	7.0	149	2.19	5.13	
9.19~10.2	13	1.6	123	1.89	4.10	
10.2~10.15	13	5.2	400	6.15	4.25	
10.15~10.30	15	3.2	213	3.28	4.55	
10.30~12.29	60	7.0	117	1.80	4.18	
12.29~35.2.1	34	5.7	173	2.66	4.48	
合計又は平均	264	48.4	183	2.82	4.97	

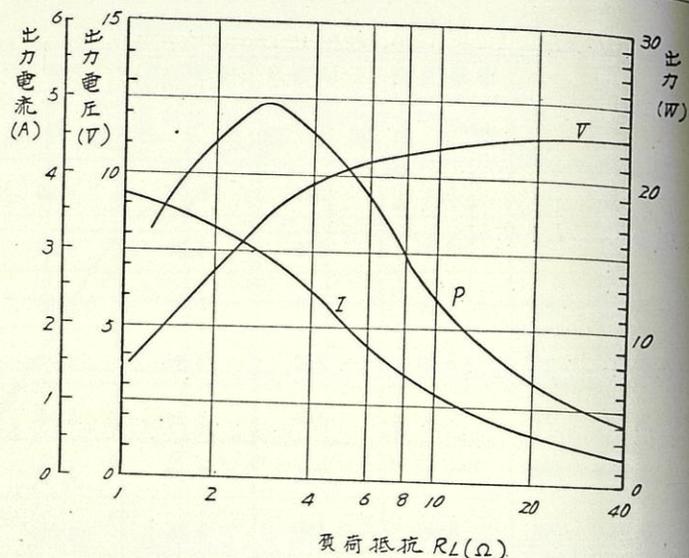
昭和34年5月13日より昭和35年2月1日まで、264日間において 66W 出力相当の1日当りの平均等価日照時間は2時間49分となる。当初設計では3時間としていたので、この想定はほぼ妥当であることが判明した。1日当りの平年日照時数の平均値と平均等価日照時間との相関はあまり見られないが、それらの比をとると日照時間は日照時数の約58%となる。

5. 太陽電池の最適負荷抵抗とアルカリ蓄電池過充電状態における太陽電池の発生電力量

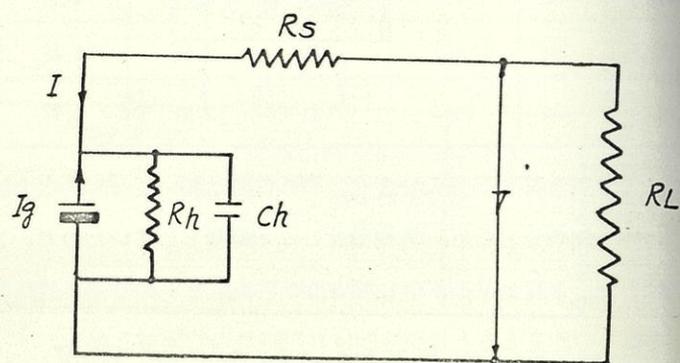
太陽電池出力は既に第7図に示したように負荷抵抗によつて著しく変化し、出力最大となる一定の負荷抵抗が存在する。この負荷抵抗を理論的に求めるために太陽電池の等価回路が第8図によつて表わされると仮定すれば太陽電池出力  $P$  と負荷端子電圧  $V$  は次式で表示される。但し並列抵抗  $R_A \rightarrow \infty$  とした。

$$P = -IV = -I \left\{ \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I + I_0}{I_0} + 1 \right) + I R_s \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$V = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I + I_0}{I_0} + 1 \right) = -I R_L \dots\dots\dots (9)$$



第7図 信夫山太陽電池 (6.5V用) 負荷抵抗-出力特性



第8図 太陽電池の等価回路

ここで  $I$ ; 負荷電流,  $V$ ; 負荷電圧,  $K$ ; ボルツマンの定数,  $T$ ; 絶対温度,  $q$ ; 電子の電荷,  $I_0$ ; 理想的  $P-N$  接合の逆飽和電流,  $I_g$ ; 定電流電源の強さ,  $R_s$ ; 直列内部抵抗である。

$$\ln\left(\frac{I+I_g}{I_0} + 1\right) \approx \frac{I}{I_g} - \ln I_0 \dots\dots\dots (10)$$

と近似展開できる。(10)を(8)に代入したものについて  $\frac{\partial P}{\partial I} = 0$  とおき,  $P$ を最大にする電流  $-I$ を求めると

$$-I = \frac{-\frac{KT}{q} \ln I_0}{\frac{KT}{qI_g} + R_s} \dots\dots\dots (11)$$

(11)に  $\frac{KT}{q} = 0.025 V^{-1}$ ,  $I_0 = 10^{-10} \text{ Amp}$ ,  $I_g = 0.1 \text{ Amp}$ を代入すると

$$-I = \frac{0.518}{0.5 + 2R_s} \approx \frac{1}{1 + 4R_s} \approx \frac{1}{4R_s} \dots\dots\dots (12)$$

更に(9)から

$$V = -IR'_L \approx 0.25I + 0.518 \dots\dots\dots (13)$$

となるから, (13)に(12)を代入して  $R'_L$ を求めると  $I \ll 1$ であるから

$$R'_L = -\left(0.25 + \frac{0.518}{I}\right) \approx -\frac{1}{2I} \approx 2R_s \dots\dots\dots (14)$$

となつて最適負荷抵抗  $R'_L$ は直列内部抵抗  $R_s$ の2倍に等しい。太陽電池素子1個当りの  $R_s$ は2.5~5Ω程度なので  $R_s = 3\Omega$ として計算した  $R'_L$ と実測値との比較を第3表に示す。

第3表 照度約  $1.1 \sim 1.2 \times 10^5 \text{ lux}$ における太陽電池の最適負荷抵抗  $R'_L$

測定年月日	測定場所	太陽電池接続		$R'_L$	$R'_L$	備考
		直列数	並列数	(計算値)	(実測値)	
33.10.25	川崎	28	63	2.7Ω	3Ω	照度約 $1.1 \times 10^5 \text{ lux}$
		207	8	156	150	
		450	2	1,360	1,500	
33.11.5	信夫山	28	63	2.7	3	照度約 $1.2 \times 10^5 \text{ lux}$
		207	8	156	150	
		450	2	1,360	1,300	

表より計算と実測とは略一致していることが判明する。

既に示した第1図のような回路により太陽電池でアルカリ蓄電池を浮動充電しつゝ使用する場  
合、晴天がかなり続くと太陽電池発生電力量は(7)によつて設計値の2倍以上となるのでアル  
カリ蓄電池は過充電状態となる。この状態で太陽電池より負荷側を見た実効抵抗はほぼ無線機電  
源入力抵抗に等しく、最適負荷抵抗  $R'_L$ より相当大きくなり充電効率の低下が予想される。信夫  
山において60V回路の充放電量を長期間実測した結果を第4表に示す。

第4表によると242日間の1日当り平均充電量は0.54AHとなり、66W出力相当の充電々流  
は0.41Aなので、66W相当日照時間に換算すると1日平均1.32時間に過ぎないのみならず、  
充電量と放電量とは殆ど等しくなっている。しかるに第2表の日照計測定結果によると1日平均  
2.8時間の日照があつたので、両者の差違はアルカリ蓄電池が過充電状態であつたために充電効  
率が低下し、放電量相当分のみ太陽電池が発電したに過ぎないと解釈される。

第4表 信夫山太陽電池(60V回路)の充・放電量の長期間測定結果

測定期間	日数	60V 充電量 AH	60V 放電量 AH	1日当り 充電量 AH	(66W相当) 1日当りの 等価日照 時間 H	備 考
34. 6. 4~ 6.15	11	22.7	18.0	2.07	5.10	66W出力時の充電 電流 0.41 A
" 6.15~ 7.13	28	12.6	13.0	0.45	1.10	
" 7.13~ 8. 3	21	12.2	9.9	0.58	1.41	
" 8. 3~ 9.19	47	21.0	21.8	0.45	1.10	
" 9.19~10. 2	13	4.3	3.7	0.33	0.81	
" 10. 2~10.15	13	13.6	10.8	1.05	2.56	
" 10.15~10.30	15	8.0	6.7	0.45	1.10	
" 10.30~12.29	60	19.7	17.2	0.33	0.81	
" 12.29~35.2.1	34	16.4	16.0	0.48	1.17	
合計又は平均	242	130.5	117.1	0.54	1.32	

6. 太陽電池表面に塵が附着した場合の影響

太陽電池表面に全散乱断面積  $Q(\text{cm}^2)$  の塵が密度  $\rho(\text{cm}^{-2})$  で附着した場合、 $\pi\rho/k^2 \cos\alpha < 1$  なる塵による太陽電池出力低下率  $\eta$  は

$$\eta \approx 1 - \frac{\rho Q}{\cos\alpha} \dots\dots\dots (15)$$

となる。ここで  $\alpha$  は入射光の入射角、 $k$  は入射光の波長定数  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  である。太陽電池の波長特性の下限は  $\lambda = 1.1 \times 10^{-4}(\text{cm})$  であるから  $k = 5.7 \times 10^{-4}(\text{cm}^{-1})$  となり、更に太陽電池表面に附着した塵が光に対し完全反射体で半径  $a$  が  $10^{-3}(\text{cm})$  以上の球状と仮定すれば  $ka \gg 1$  となる。従つて  $Q$  は幾何光学的近似により

$$Q = 2\pi a^2 = 2S \dots\dots\dots (16)$$

である。 $S$  は球の幾何学的断面積である。(16)を(15)に代入すれば

$$\eta \approx 1 - \frac{2S}{\cos\alpha} \dots\dots\dots (17)$$

となるから、(17)は入射光進行方向直角な面内  $1(\text{cm}^2)$  を通過する光束によつて照射される面積内で、塵で覆われた面積の割合  $\rho S$  の2倍だけ出力が減少することを示している。<sup>昭35.4.6</sup> 晴天)  $12^\circ 30' \sim 12^\circ 50'$  において日照計用1素子の短絡電流を測定したところ  $65\text{mA}$  あつたのが表面を拭いた後  $67\text{mA}$  となつた。短絡電流が出力に比例すると仮定し、且つ  $\alpha = 0$  として(17)より  $\rho S$  を逆算すると  $\rho S = 1.5 \times 10^{-2}(\text{cm}^2)$  であり、これによつて出力は3%低下したことにな

る。過充電防止用ダイオードの損失が1%、アルカリ蓄電池自己放電による損失が5%程度なので、3%の損失は無視できないものと考えられる。

7. 結 言

以上の所論より得られた結論を列記すると次のようになる。

- (A) 信夫山太陽電池の最大出力は設計値  $50\text{W}$  に対し約30%多い  $66\text{W}$  が得られた。これを素子1個当りに換算すると約  $16\text{mW}$  となる。
- (B)  $66\text{W}$  出力相当の1日平均等価日照時間は264日間の測定結果より2時間49分で、これは設計値3時間とほぼ一致する。信夫山の年間可能発生電力量は約  $72\text{kWh}$  となる。
- (C) 太陽電池・アルカリ蓄電池の容量決定に際し、充電量対放電量の時間比率を  $10:1$  とした最初の設計は信夫山の場合妥当と考えられる。
- (D) 任意の地点において任意に傾けて設置された太陽電池表面照度(日射量)の時間変化に関する理論式を導いた。この式を用いて晴天時照度の時間的変化を計算した結果と実測値とはよく一致する。
- (E) 太陽電池の最適負荷抵抗は直列内部抵抗の約2倍であり、信夫山の場合素子1個について数  $Q$  程度である。
- (F) 晴天時の  $66\text{W}$  相当等価日照時間は7時間38分で設計値6時間より約27.5%多く、そのため晴天が長く続くとアルカリ蓄電池が過充電状態となる。この場合には太陽電池から負荷側を見た実効抵抗は最適負荷抵抗に比較して著しく大きくなるので充電効率が低下し、太陽電池発生電力は最大値の約  $1/10$  に減少することがある。
- (G) 太陽電池の設置場所は空気の澄んだ塵埃の少ない場所であることが望ましい。

以上のように太陽電池の実用性について貴重な資料を得ることができた。更に最近では太陽電池表面処理技術の向上によつて変換効率が高くなり、素子1個当りの出力は約  $23\text{mW}$  と信夫山の  $16\text{mW}$  より約44%も増加している<sup>2)</sup>。また D. C—D. C コンバータ使用による太陽電池構成の簡易化、高周波電力トランジスタの開発に伴う無線機のトランジスタ化の推進によつて、無線電源としての太陽電池は今後大きな発展が期待されるので引き続き研究を行なう所存である。最後に本論文中的実測データは福島支店線路課通信係榎井係長、佐藤氏、福島通信所加藤主任、二瓶氏、外福島支店関係各位によつて測定された旨を明記すると共に衷心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 山内； 太陽電池利用無線中継所について  
日本電気協会第38回研究会講演論文 (昭34-5)
- 2) 三好； トランジスタ無線機の電源について (太陽電池)  
第12回通信技術懇談会資料
- 3) 例えば M. B. Prince ; J. A. Phys., 26, P 534 (May 1955)
- 4) 林； シリコン太陽電池の特性および応用  
通学誌 P. 780 (昭33-8)
- 5) 福島の気象平年値  
福島測候所編