

# 集光による太陽光発電の出力向上の検討

和田 大毅<sup>1)</sup>・房野 俊夫<sup>2)</sup>・渡辺 和也<sup>3)</sup>・大塚 馨象<sup>4)</sup>

## Study of PV cell Performance with Solar Energy Collecting System

Tomoki WADA, Toshio BOUNO, Kazuya WATANABE, Keizou OHTSUKA

### Abstract

Recent years, because of serious energy and environmental problems, some new energy technologies are developing in the world. One of the promising new energy technologies is Photovoltaic cell (PV cell). But PV cell has many problems such as high cost and low power density.

In this study, we tried to do enhancement of PV cell power output at low cost. So, we produced a few Solar Energy Collecting Photovoltaic cells with plane mirror (SEC-PV), and we tested this new system (SEC system).

The results are as follows:

- (1) PV cell power output is able to increase by the area ratio of plane mirror, and the limit of increase is about 2.0.
- (2) Installation angle of plane mirror is decided by the area ratio of plane mirror and PV cell.
- (3) Maximum electric energy ratio by this SEC system is about 1.18, and in this case, the area ratio of plane mirror and PV cell is about 1.0.

Key Words:

New Energy Technology, Solar Energy, Photovoltaic cell

### 1. はじめに

近年,世界的な人口の増加や生活水準の向上に伴うエネルギー消費量の増大による,化石資源の枯渇や地球温暖化ガスの増大,酸性雨などによる環境悪化が大きな問題となっている。特に人口の増加は著しく,2002 年末には既に 62 億人,2050 年には約 100 億人に達すると予想されており,今後のさらなるエネルギー消費量の増大は避けられない状況となっている。

そのため,化石資源を使用せず,かつ環境に優しいエネルギーの開発が急務となっており,新エネルギーの一つである太陽光発電が注目されている。

太陽光発電は非常に優れた発電方式であるが,低出力密度,高コストという問題も持っており,これらの問題がその普及を妨げている。そこで,本研究では集光することにより,低コストで太陽電池の出力を向上させることができるのではないかと考え,平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)を製作し,これを用いて平面鏡集光方式(SEC システム)について検討を行った。なお,SEC-PV は Solar Energy Collecting Photovoltaic cell with plane mirror の略であり,SEC システムは Solar Energy Collecting system の略である。

1)電気電子工学専攻大学院生

2)佐土原高校教諭

3)電気電子工学科技官

4)電気電子工学科教授

## 2. 平面鏡集光方式について

### 2.1 南中時最大出力となる平面鏡集光方式

平面鏡集光方式(SEC システム)としては、①日射量が最大となる南中時刻付近で太陽電池出力が最も増幅されるように平面鏡を設置し、得られる電力量の絶対値を増加させる方式と、②南中時刻を挟んだ日射量の低くなる時間帯において出力が最も増幅されるように平面鏡を設置し、日中における出力平均化を図る方式などが考えられる。本研究では、①南中時刻付近で太陽電池の出力を最も増幅させる方式について検討を行うこととした。

### 2.2 太陽電池に対する平面鏡の設置方法

平面鏡集光方式(SEC システム)により太陽電池出力を向上できることが確認されている<sup>1)</sup>が、その出力増幅の割合は太陽電池に対する平面鏡の設置条件によって大きく異なる。

そこで、太陽電池に対して平面鏡を図 2-1 に示すように設置することを基本条件とし、太陽電池と平面鏡の成す角度(以後、平面鏡設置角度という)、及び太陽電池を基準とした平面鏡の面積との比(以後、平面鏡面積比という)を変化させ、これにより太陽電池の出力がどのような影響を受けるのかについて検討を行った。なお、平面鏡面積比の調整については、図 2-1 に示すように太陽電池と平面鏡の横幅の長さを同一とし、太陽電池の縦幅に対する平面鏡の縦幅を変えることにより調整した。

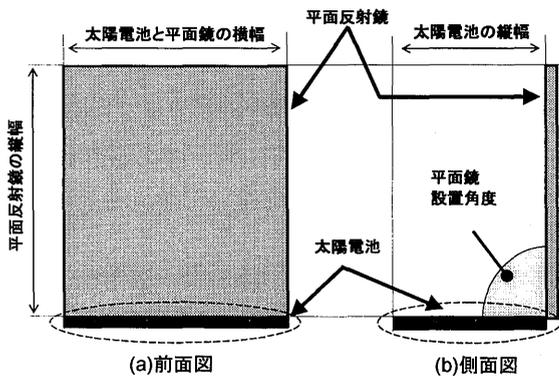


図 2-1 平面鏡の設置方法

以上のことをふまえた上で、平面鏡集光方式(SEC システム)の検討を進めるにあたり平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)を製作した。

## 3. 平面鏡集光式太陽電池の製作

図 3-1 に製作した平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)を示す。

太陽電池設置角度及び平面鏡設置角度が自由に調整可能な構造となっており、さらに平面鏡表面を反射防止材で覆いこの反射防止材の大きさを変えることで、平面鏡面積比を調整できる構造とした。また、集光に伴って電池温度の上昇が予想されるため、集光型太陽電池土台部と太陽電池をステンレスメッシュを介して接続することで太陽電池裏面を開放し、太陽電池裏面の通気性を高める構造とした。

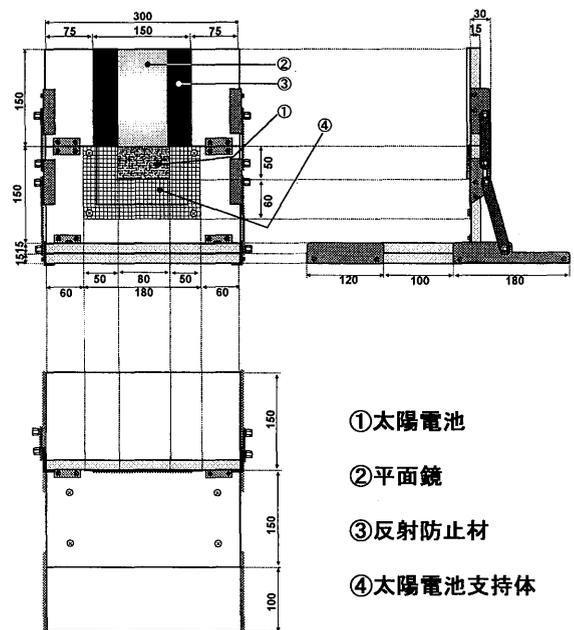


図 3-1 平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)の詳細図

表 3-1 に平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)に使用した太陽電池等の仕様を示す。

表 3-1 太陽電池等の仕様

名称	材質	寸法
①太陽電池	単結晶 Si	面積：80×50(m <sup>2</sup> )
②平面鏡	水銀鏡	面積：100×150(m <sup>2</sup> )
③反射防止材	天然ゴム	
④太陽電池支持体	ステンレスメッシュ	面積：110×180(m <sup>2</sup> ) 開孔率：64(%) 線径：1(mm)

#### 4. 平面鏡集光方式の基礎的検討

##### 4.1 検討内容

南中時刻付近で太陽電池出力を最も増幅させることを目的としているため、太陽電池に対して垂直に太陽光が照射されている状況を想定し、平面鏡設置条件と太陽電池出力の増幅の関係について理論計算及び実験により検討を行った。

##### 4.2 理論計算による検討

物質に入射した光が反射する場合、光の入射角と反射角は等しく<sup>2)</sup>、光の軌跡は図4-1に示すようになる。図4-1に示すように平面鏡の反射光全てが太陽電池に入射されるわけではないため、平面鏡設置角度に対して有効な(太陽電池への集光に寄与する)平面鏡面積は制限される。

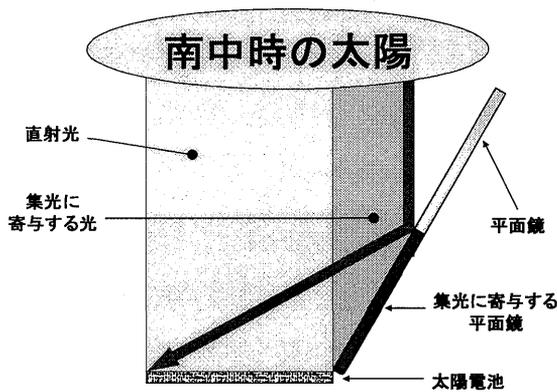


図4-1 平面鏡による集光

以上のことをふまえた上で、図4-2に示すように太陽電池及び平面鏡の各部位の長さや、設置角度等を定義すると、平面鏡面積  $M$  や太陽電池全受光量  $I$  などは次のように示すことができ、その関係を数式化すると式(4-1)、(4-2)を得ることができる。

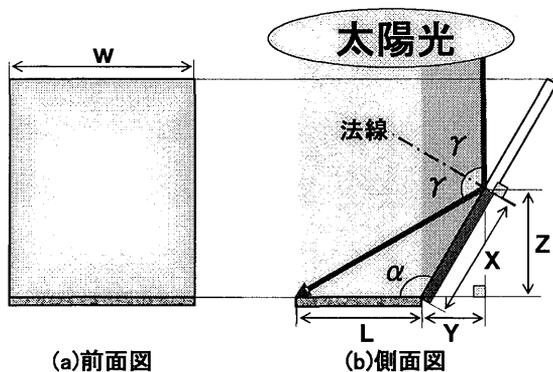


図4-2 理論式の導出

- 太陽電池面積 :  $A=L \times W$
- 有効な平面鏡面積 :  $M=X \times W$
- 太陽電池直射光量 :  $I_1=L \times W$
- 集光に寄与する光量 :  $I_2=Y \times W$
- 太陽電池全受光量 :  $I=I_1+I_2$
- 平面鏡設置角度 :  $\alpha$ , 反射角(入射角) :  $\gamma$

$$M = \frac{A}{\tan(2\alpha - \pi) - \tan(\alpha - \pi/2)} \times \frac{1}{\cos(\alpha - \pi/2)} \quad (4-1)$$

$$I = \frac{I_1}{\tan(2\alpha - \pi) - \tan(\alpha - \pi/2)} \times \tan(\alpha - \pi/2) + I_1 \quad (4-2)$$

図4-3は式(4-1)、(4-2)に任意の数値を代入して有効な平面鏡面積  $M$  と太陽電池全受光量  $I$  を求め、その結果を元に平面鏡面積比  $S(=M/A)$  と平面鏡設置角度  $\alpha$ 、集光比  $R(=I/I_1)$  の関係についてまとめたものである。

図4-3より平面鏡面積比  $S$  と平面鏡設置角度  $\alpha$ 、集光比  $R$  の関係として、平面鏡面積比  $S$  が增大するほどそれに対応する平面鏡設置角度  $\alpha$  は  $90^\circ$  に近づく傾向にあり、その範囲は  $90^\circ \sim 135^\circ$  であること、また、平面鏡面積比  $S$  の増大により最大2倍の集光比が得られるが、面積比3倍以上では平面鏡面積比  $S$  の増大に対する集光比  $R$  の増加がほとんどなくなることがわかった。

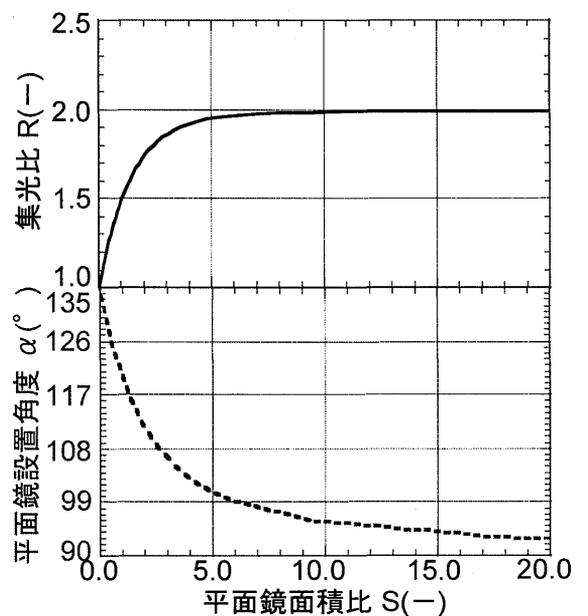


図4-3 理論計算による平面鏡設置条件と集光比の関係

4.3 実験による検討

表 4-1 に平面鏡設置条件の検討パターン,図 4-4 に実験装置配置図を示す。

光源にはソーラー・シミュレータを用い,その出力を全天日射量計とデータ・ロガーにより設定して任意の光強度の光を太陽電池に対して垂直に照射するとともに,実験室内の空調設備等を用いて電池温度の調節を行い,熱電対,データ・ロガーにより電池温度の測定及び設定を行った。そして,日射量,電池温度を一定とした条件の下で可変抵抗を操作し,X-Y レコーダで太陽電池出力の測定を行った。

表 4-1 平面鏡設置条件の検討パターン

平面鏡面積比 S(A.U.)	平面鏡設置角度 $\alpha(^{\circ})$
0.5	90° ~135°
1.0	
2.0	
3.0	

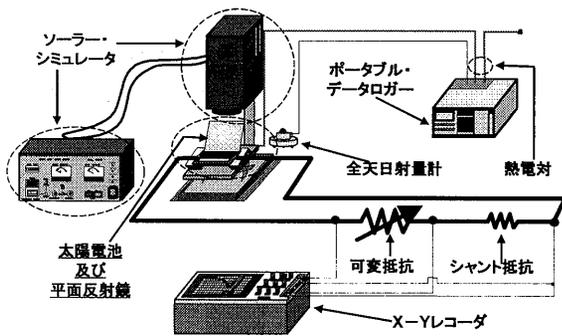


図 4-4 屋内実験装置配置図

図 4-5 に日射量 1000(W/m<sup>2</sup>),電池温度 35(°C)一定の実験条件における,平面鏡設置条件と出力比 P の関係についてまとめたものを示す。なお,出力比 P とは集光無太陽電池を基準とした集光型太陽電池との出力の比である。

図 4-5 より平面鏡面積比 S が增大するほど出力比 P も増加する傾向にあり,また,理論計算の結果と同様に各平面鏡面積比において,出力比 P が最大となる平面鏡設置角度  $\alpha$  は平面鏡面積比 S が增大するほど垂直に近づく傾向にあることが確認できた。そして,平面鏡面積比 S 3.0 倍において約 1.65 倍の出力の向上が確認された。

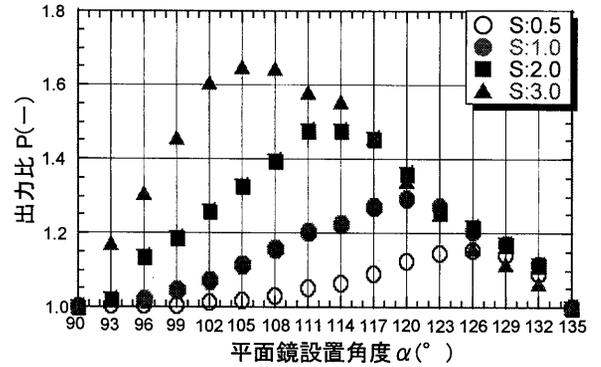


図 4-5 平面鏡設置条件と出力比の関係

4.4 理論値と実験値の比較

図 4-6 に理論値と実験値の比較を示す。理論値には,太陽電池出力が照射される光強度に比例して増加するために集光比 R を出力比 P として用いており,実験値には図 4-5 の各平面鏡面積比における最大の出力比 P を用いている。

図 4-6 より全ての点において理論値が実験値を上回っているが,平面鏡面積比 S が增大するほどその差が減少する傾向となることがわかった。これは,(平面鏡の)反射光の太陽電池に対する入射角が平面鏡設置角度  $\alpha$  の影響を受け,平面鏡設置角度  $\alpha$  が 90° に近づくほどその入射角が垂直に近づくため,平面鏡面積比 S が增大する(平面鏡設置角度  $\alpha$  が 90° に近づく)ことにより,太陽電池表面における光の散乱が減少するためであると考えられる。

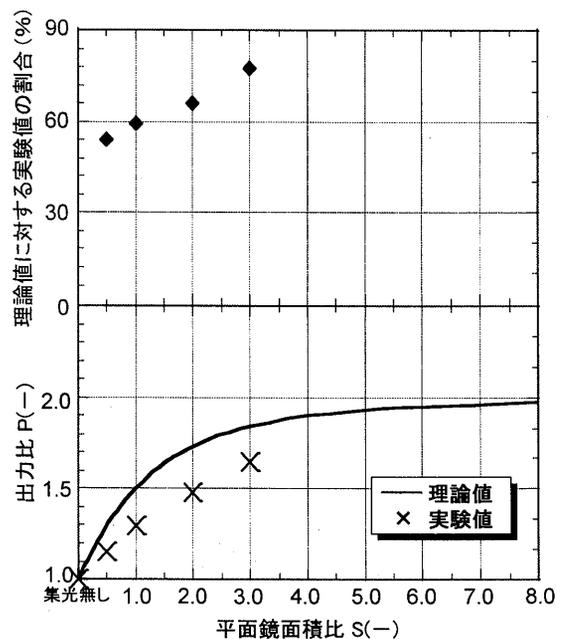


図 4-6 理論値と実験値の比較

理論計算と実験結果より、平面鏡面積比  $S$  と平面鏡設置機角度  $\alpha$  は対の関係にあることと、その組み合わせを明らかにすることができた。そこで以上のことをふまえた上で、実使用条件の元で平面鏡集光方式(SEC システム)について検討を行った。

### 5. 実太陽光による平面鏡集光方式の評価

#### 5.1 検討内容

集光に伴う太陽電池温度上昇の影響についての検討、及び平面鏡設置条件の違いにより日中を通して得られる電力量がどのように変化するか、そして、得られる電力量から評価してどの平面鏡設置条件が最適であるかについて検討を行った。

#### 5.2 実験装置及び実験方法

実使用条件における平面鏡集光方式(SEC システム)の評価を行うにあたり、平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)を複数機製作し、各太陽電池の平面鏡設置条件を第 4 章の結果を元に設定した。そして、実験に応じて複数の平面鏡集光式太陽電池(SEC-PV)を選択、使用した。表 5-1 は各太陽電池の平面鏡設置条件についてまとめたものである。表中の NT-PV は Normal Type Photovoltaic cell の略である。

表 5-1 平面鏡設置条件の検討パターン

名称	平面鏡設置条件	
	面積比 $S$	設置角度 $\alpha$
NT-PV		
SEC-PV [0.3]	0.3	129
SEC-PV [0.5]	0.5	126
SEC-PV [1.0]	1.0	120
SEC-PV [1.5]	1.5	115
SEC-PV [2.0]	2.0	111
SEC-PV [3.0]	3.0	105

図 5-1 に実験装置配置図、図 5-2 に実験状況の一例を示す。可変抵抗とシャント抵抗を直列に接続し、その両端を切替スイッチの出力側端子に接続している。切替スイッチの入力側端子には各太陽電池の出力が印加されており、切替スイッチの出力側端子と入力側端子を短絡することで任意の太陽電池の出力を取り出せる。また、日射量及び電池温度、周辺

温度を測定するため全天日射量計、熱電対を用いた。なお、全ての太陽電池は南中時刻に太陽光が太陽電池に垂直に照射されるように設置している。

実験方法としては、切替スイッチを切り替えて各太陽電池の出力を X-Y レコーダーで測定する一連の作業を 1 サイクルとし、この作業を日中を通して 10~20 分間隔で繰り返して行った。

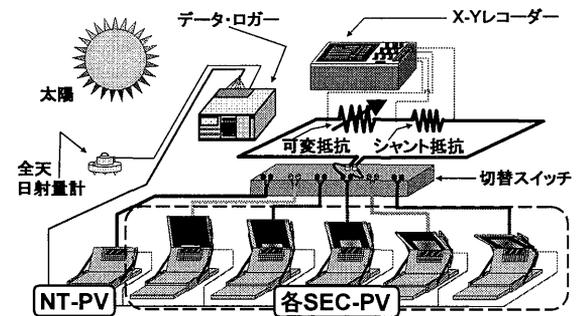


図 5-1 屋外実験装置配置図

(南中時刻に太陽光が太陽電池に垂直に照射)

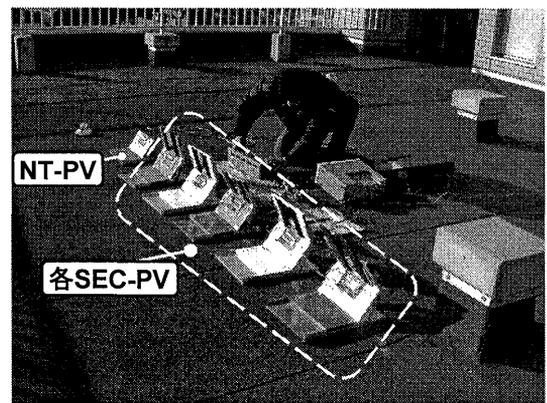


図 5-2 実験状況

#### 5.3 集光に伴う太陽電池温度上昇についての検討

表 5-2 に実験条件を示す。

表 5-2 実験条件

気温(°C)	6.8~9.1
日射量(W/m <sup>2</sup> )	440~763
使用した太陽電池	NT-PV SEC-PV [0.3] SEC-PV [0.5] SEC-PV [1.0] SEC-PV [1.5] SEC-PV [2.0]

図5-3に実験当日の日射量と気温の時間変化を示す。

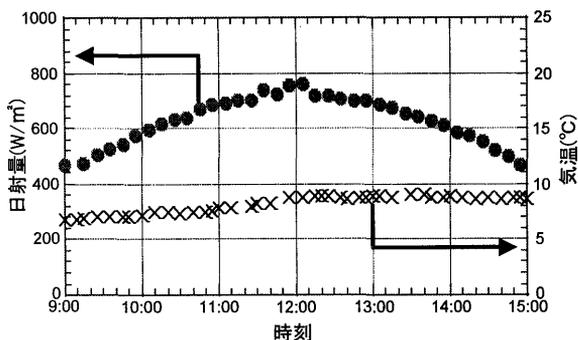


図 5-3 日射量と気温の時間変化

図5-4に日射量に対する電池温度差及び出力比の変化を示す。なお、電池温度差とは集光無太陽電池を基準とした集光型太陽電池との電池温度の差であり、出力比とは集光無太陽電池を基準とした集光型太陽電池との出力の比である。また、図5-3を見てわかるように日射量は南中時刻付近で極大値を示している。

図5-4より、集光により電池温度は上昇するが、電池温度上昇による出力低下の影響よりも集光による出力向上の影響の方が大きいことが明らかである。また、いずれの集光式太陽電池においても、日射量が最大となる南中時刻付近において、最も出力が増幅されていることが確認できた。

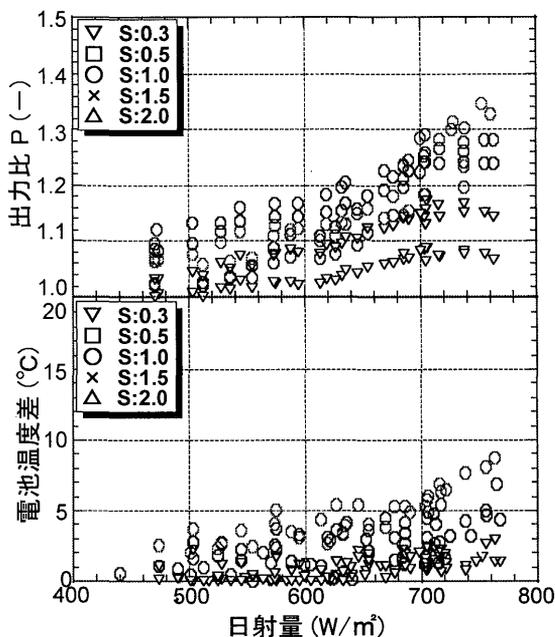


図 5-4 集光による電池温度上昇の影響

5.4 平面鏡設置条件と電力量の関係

3 ケースの異なる気象条件の下で、様々な平面鏡設置条件における電力量の比較を行なった。図5-5に各ケースの日射量及び気温の時間変化を示す。

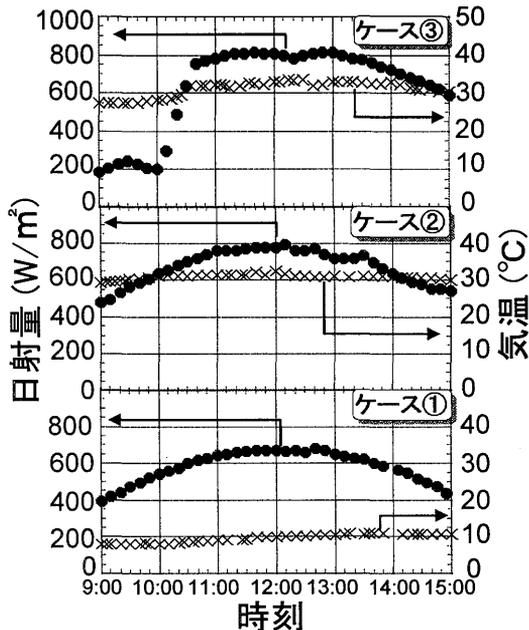


図 5-5 各ケースにおける日射量と気温の時間変化

図5-6に各ケースにおける太陽電池出力の時間変化を示す。図5-6よりいずれのケースにおいても集光式太陽電池の出力が集光無太陽電池の出力を上回っていることがわかる。

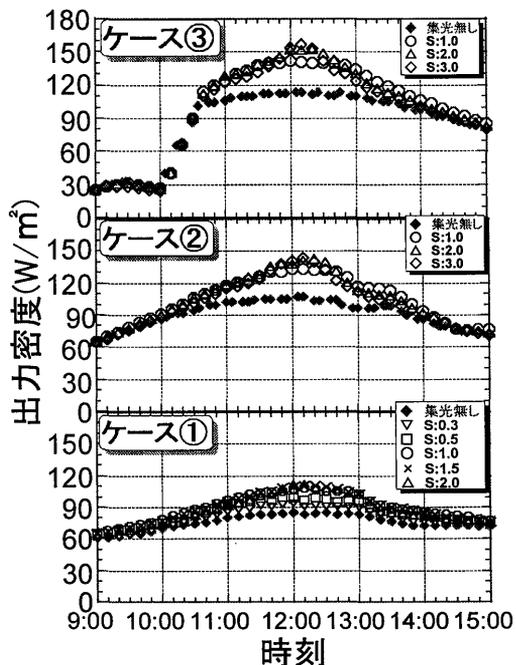


図 5-6 各ケースにおける太陽電池出力の時間変化

図 5-7 に図 5-6 の結果より求めた累積電力量についてまとめたものを示す。

図 5-7 より、どのケースにおいても集光式太陽電池の電力量が集光無太陽電池の電力量を上回っていることがわかる。

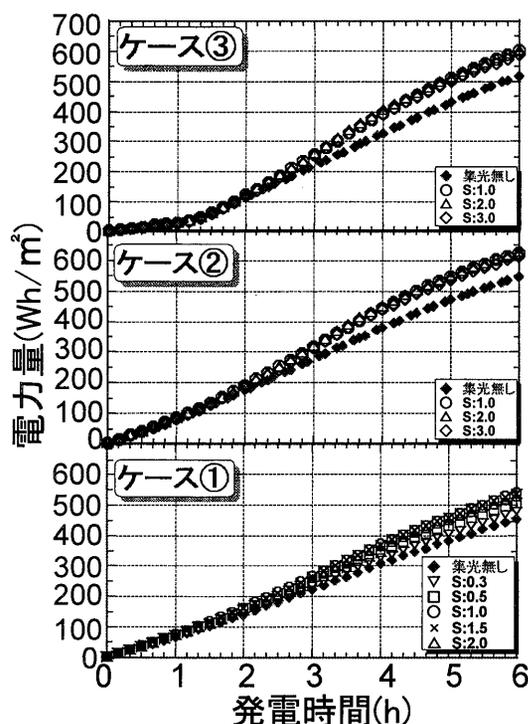


図 5-7 各太陽電池の累積電力量

図 5-8 は図 5-7 の結果を元に平面鏡設置条件と電力量比の関係についてまとめたものである。ここで、電力量比とは集光無太陽電池を基準とした集光式太陽電池との電力量の比である。なお、表 5-1 に示すように、平面鏡面積比  $S$  に対して平面鏡設置角度  $\alpha$  は固定設定されている。

図 5-7 より、いずれのケースにおいても平面鏡面積比  $S$  1.0~2.0 倍の間で高い電力量比が得られており、特にケース 1 において平面鏡面積比  $S$  1.0 倍で最大 1.18 倍の電力量比が得られていることがわかる。また、平面鏡面積比  $S$  2.0 倍以上では 1.0~2.0 倍の場合と比べて得られる電力量比が減少する傾向にあることがわかった。このような結果となった理由として以下のことが考えられる。平面鏡設置条件において平面鏡面積比  $S$  と平面鏡設置角度  $\alpha$  は対の関係にあり、平面鏡面積比  $S$  が増大するほど平面鏡面積比  $\alpha$  が  $90^\circ$  に近づく。今回検討した平面鏡集光方式(南中時最大出力)では、太陽高度が下がるに

つれて集光の効果が低下するが、その低下は平面鏡設置角度  $\alpha$  が  $90^\circ$  に近づくほど著しくなるため、得られる電力量がこのような結果になったと考えられる。

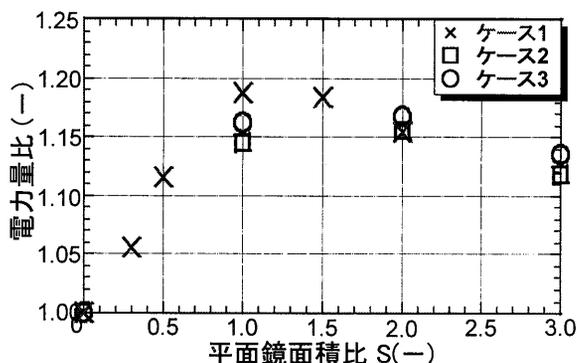


図 5-8 平面鏡設置条件と電力量比の関係

## 6. まとめ

本研究を総括すると以下のようにまとめられる。

- (1) 太陽電池に垂直に光を照射した場合、平面鏡面積比と平面鏡設置角度は相関関係にあり、面積比が増大すると対応する平面鏡設置角度は  $90^\circ$  に近づくことを理論的かつ実験的に明らかにした。
- (2) 太陽電池に対して垂直に光を照射した場合、理論的には最大で 2.0 倍の出力向上が可能である。なお、実験的には平面鏡面積比 3 倍において約 1.65 倍の出力向上が得られた。
- (3) 集光に伴う電池温度上昇による太陽電池出力低下の影響よりも、集光による太陽電池出力向上の効果の方が大きいことを明らかにした。
- (4) 日中を通して得られる電力量を考慮した最適な平面鏡設置条件は、平面鏡面積比 1 倍(平面鏡設置角度  $120^\circ$ )であり、集光をしていないものと比べて、最大で約 1.18 倍の電力量の増加が得られた。

## 参考文献

- (1) 和田 大毅 他 3 名:「集光による太陽電池出力への影響の検討-その 2」, 平成 14 年度電気関係学会九州支部連合大会論文集 225, p69, 202
- (2) 大槻 義彦:「改定新版 物理学 I」, (株)学術図書出版社, 1995