

フレネルレンズを用いた集光型太陽光発電の検討

岩切敏哉¹⁾・房野俊夫²⁾・三宅琢磨³⁾・大塚馨象⁴⁾

Study of PV cell Performance with Solar Energy Collecting System

Toshiya IWAKIRI, Toshio BOUNO, Takuma MIYAKE, Keizou OHTSUKA

Abstract

In this study, we aimed to attempt the output improvement of PV Cell by Solar Energy Collecting System with Fresnel Lens (SEC system). We examined installation requirements of PV cell and the Fresnel lens, and tested SEC system. We used a convex type and a linear type Fresnel lens. Because a convex type had caused the decrease in the output because of the shadow with the frame of the lens, installation requirements were examined for linear type.

The results are as follows:

- (1) We derived the formula for the determination of best installation distance between PV cell and linear type Fresnel lens.
- (2) The effect of the PV cell output improvement by SEC system is larger than the decrease of PV cell power output by rise of the temperature.
- (3) It was clarified that it was more effective to set up the linear type Fresnel lens in the range of low quantity of solar radiation.

Key Words:

Solar cell, Solar energy, Fresnel lens

1. はじめに

世界のエネルギー需要は、経済成長に伴って急速に増加しており、今後もアジアを中心とする発展途上国の経済成長と人口増加で、一層の増大が予想されている。今、世界のエネルギーの大部分は石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料で賄われているが、その資源には限りがある。また、地球環境問題からも使用量の増加は好ましくないため、化石燃料を使用せず、かつ環境に優しいエネルギーの開発が急務となっている。

なかでも、新エネルギーである太陽電池を用いた太陽光発電は、今後の大きな期待がかけられているものの一つである。

太陽光発電は地球環境問題や資源の枯渇の懸念に対して非常に有効な手段であるが、その反面、低出力密度、高コストなどの問題も持っており、これらの問題がその普及を妨げている。そこで、本研究では太陽電池の短所の一つであるエネルギー密度が低く発電コストが高いという点に着目し、フレネルレンズ集光方式(SECシステム)により太陽電池の受光量を増やして出力向上を図ることを目的とし、検討を行ったので報告する。なお、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. フレネルレンズによる集光

2.1 フレネルレンズとは

フレネルレンズは光学的には凸レンズあるいは凹レンズ等の効果をもちながら、形状は平板状のレンズ(図1)を言い、レンズの軽量コンパクト化に大きな効果を発揮している。

フレネルレンズは薄く平板状であり軽いため従来の凹凸レンズでは不可能であった機器・器具への装着が可能であり、凹凸レンズの組み合わせ、レンズの枠の一体化、四角形、三角形等、今までの概念にとらわれない形状のレンズを作ることができるなどの特徴がある。

また、フレネルレンズはガラス又はアクリル樹脂、ポリカーボネート、高密度ポリエチレン等で製作することができる。

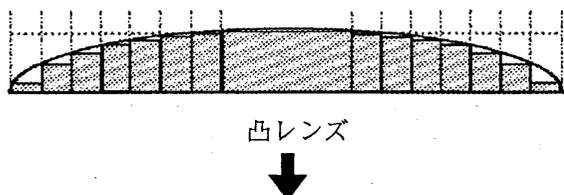


図1 フレネルレンズ

2.2 C型フレネルレンズ

凸レンズをフレネルレンズ化したものをC型フレネルレンズと呼ぶ。図2のようにレンズに入射してきた光を一点で集光するものである。

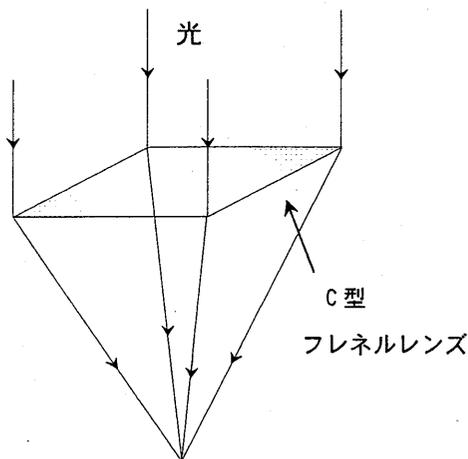


図2 C型フレネルレンズの集光

2.3 L型フレネルレンズ

L型フレネルレンズはシリンドリカルレンズをフレネルレンズ化したものを称し、図3のようにレンズに入射してきた光を一方向だけ集光または拡散するものであり、直線状の焦点パターンを持っている。

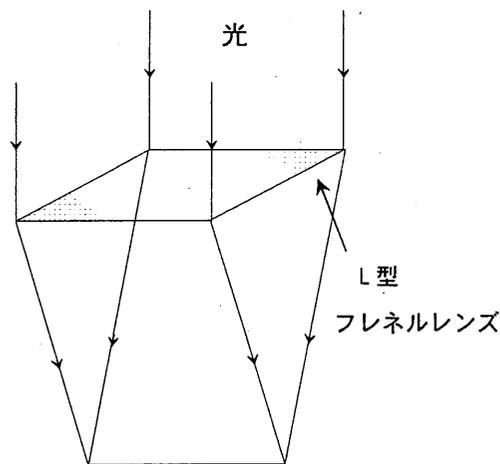


図3 L型フレネルレンズの集光

3. C型フレネルレンズによる集光方式

3.1 検討内容

C型フレネルレンズ集光方式において太陽電池出力がどのように影響を受けるかについて、実験及び検討を行った。

3.2 実験装置及び実験方法

図4に実験回路図を、表1に太陽電池及びC型フレネルレンズの仕様を示す。

図4の実験回路に示すように集光型太陽電池(Solar Energy Collecting Photovoltaic Cell, 以後 SEC-PV と略す)と集光無太陽電池(Normal Type Photovoltaic Cell, 以後 NT-PV と略す)を南中時に太陽と垂直になるように設置し、切替 SW により、NT-PV 及び SEC-PV の電圧-電流(V-I)特性を測定する一連の作業を1サイクルとし、このサイクルを10分の時間間隔で繰り返して行い、各太陽電池出力を求めた。

表1 太陽電池及びT型フレネルレンズの仕様

太陽電池	面積: $80 \times 50 (\text{mm}^2)$ 材質: 単結晶シリコン
C型フレネルレンズ	面積: $150 \times 150 (\text{mm}^2)$ 焦点距離: 110 mm

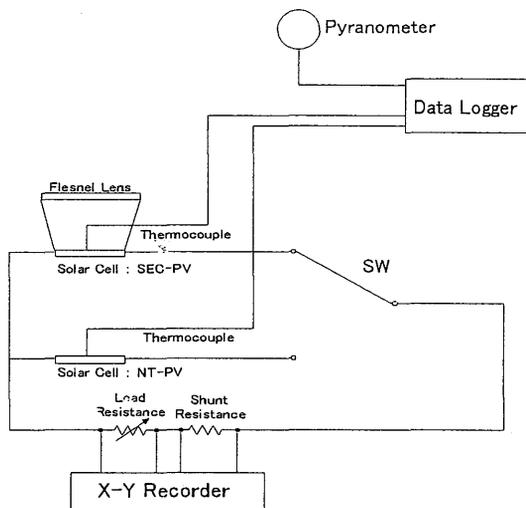


図4 実験回路図

3.3 実験結果

図5はNT-PVとSEC-PVの出力の時間変化についてまとめたものである。SEC-PVは10:00~10:30まではNT-PVの出力の1/5程度しか発電しておらず、10:30を過ぎると出力は上がり始め、11:00にNT-PVの出力を上回った。しかし、13:10を過ぎると出力は再び下がり始め、13:50にはNT-PVの出力を下回る結果となってしまった。

SEC-PVの出力低下の原因となっているのは、今回用いたC型フレネルレンズと太陽電池との関係から図6に示す写真のように照射光の周りには陰が生じてしまい、太陽が動くことによってその影が太陽電池表面を覆ってしまう時間帯が存在したためである。陰は太陽電池出力の大幅な低下の原因であり、C型フレネルレンズを使用することによって生じる陰で出力が低下してしまい出力向上の効果はあまり得られなかった。

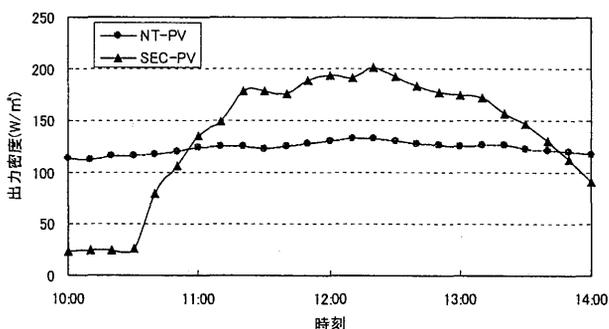


図5 各太陽電池の経時変化

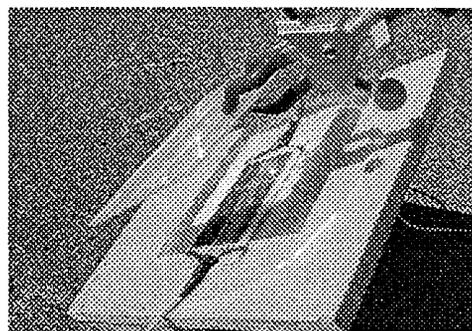


図6 太陽電池と照射光及び陰の位置関係

今回の実験では一日を通して集光しようとしたとき、図6のように陰が太陽電池上を通過してしまうため、出力の低下をまねいてしまう結果となった。より効果的にC型フレネルレンズを用いて屋外で集光しようと思ったら、太陽を追尾することや太陽電池に対して大きなC型フレネルレンズを用いて集光を行うことが考えられる。しかし、太陽を追尾するためにはそれなりの電気を消費してしまうため効果は少ないと思われる。また、大きなレンズを用いても陰ができることは解消できない。さらにC型フレネルレンズで集光比を高くしようとするとその分、陰の面積も増えてしまうので今回用いたC型フレネルレンズは太陽電池出力向上のための集光方式には有効でないと考えられる。

そこで、今回用いたC型フレネルレンズより集光度は劣るが一方向のみ集光するL型フレネルレンズを用いれば太陽電池が陰に覆われることなく集光した光を照射できるのではないかと考えた。

4. L型フレネルレンズによる集光方式

4.1 検討内容

レンズを用いることにより集光が可能であり、太陽電池出力を向上できることわかっているが、その出力増幅の割合は太陽電池に対するレンズの設置条件によって大きく変化することが考えられる。L型フレネルレンズをより有効に活用するためには、太陽電池とL型フレネルレンズ設置条件について考慮する必要がある。ここではL型フレネルレンズの設置条件と出力増幅の関係について、シミュレーションにより検討を行った。

4.2 太陽電池受光量の数式化

図7及び図8に示すように、太陽電池、L型フレネルレンズ及び照射面積等の各部位の長さを定義した。また、図8には日の出から南中時までの太陽の移動による集光状況を示している。

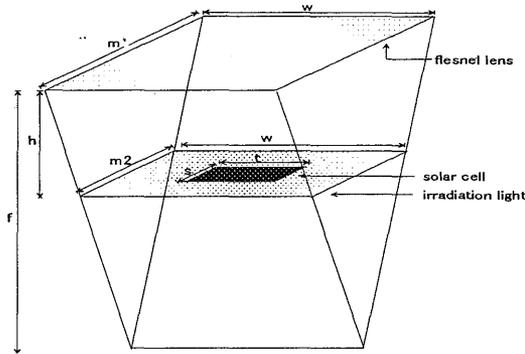


図7 位置関係の詳細図

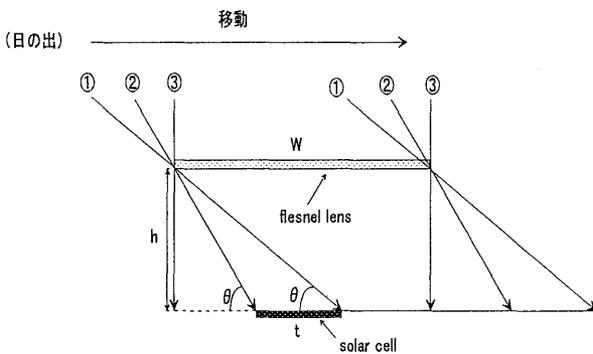


図8 太陽の移動による集光状況

日射量を Q 、L型フレネルレンズの日射透過率 A と決め、日の出～①、①～②、②～③における太陽電池の全受光量 L についてそれぞれ数式化したところ、(1)、(2)、(3)の3つの式が得られた。

$$L = st \times Q \tag{1}$$

$$L = s \left\{ \frac{h}{\tan \theta} - \frac{w-t}{2} + A \left(w - \frac{h}{\tan \theta} - \frac{w-t}{2} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{f \sin \theta}} \right) \right\} \times Q \tag{2}$$

$$L = \frac{st}{1 - \frac{h}{f \sin \theta}} \times Q \times A \tag{3}$$

4.3 シミュレーションによる最適設置距離の検討

L型フレネルレンズを設置するとき最も効率が良くなるように設置することを検討した。太陽電池及びL型フレネルレンズを表2のように設定し、設置距離を変化させていき、太陽電池受光量がどのように変化していくのか検討を行った。

表2 太陽電池及びL型フレネルレンズの仕様

太陽電池	面積：20×51 (mm ²)
L型フレネルレンズ	面積：100×51 (mm ²) 焦点距離：150 mm 日射透過率：88%

図9は通常型太陽電池の全受光量を基準としたときの設置距離と太陽電池全受光量比の関係を示したものである。図9より、設置距離が離れているほど太陽電池全受光量は高くなっていることがわかる。また、表2の条件において設置距離が108.6 mmを超えると照射光幅が太陽電池幅よりも小さくなってしまいうため太陽電池表面に陰ができてしまい不適切である。

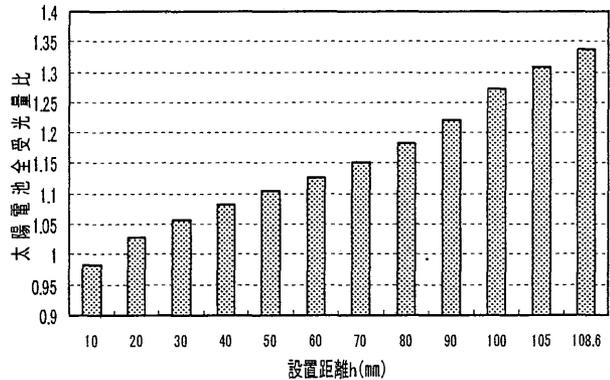


図9 設置距離と太陽電池全受光量比の関係

以上のことより、太陽電池とL型フレネルレンズの最適設置距離について、以下の式を導出した。

$$h = f \sin \theta \left(1 - \frac{s}{m1} \right) \tag{4}$$

$$\theta = \arccos \frac{w + t}{2f \left(1 - \frac{s}{m1} \right)} \tag{5}$$

太陽電池のサイズ及びL型フレネルレンズのサイズ、焦点距離が決まれば最適設置距離は(4)、(5)式を用いて求めることができる。

5. L型フレネルレンズ集光方式の評価

5.1 検討内容

L型フレネルレンズ集光方式太陽電池を用いて屋外において実験を行い、L型フレネルレンズ集光方式の太陽電池出力への影響と太陽電池温度への影響について検討を行った。

5.2 実験装置及び実験方法

各太陽電池のL型フレネルレンズ設置条件を第4章で導出した式を元に設定した。表3は各太陽電池のL型フレネルレンズ設置条件についてまとめたものである。また、太陽電池には20×51[mm²]の単結晶シリコン製、レンズの焦点距離は110[mm]のものを用いた。条件として全ての太陽電池は南中時に太陽と垂直になるように設置した。

表3 L型フレネルレンズ設置条件の設定パターン

名称	L型フレネルレンズ設置条件	
	面積(mm ²)	設置距離(mm)
NT-PV		
SEC-PV[100×51]	100×51	108
SEC-PV[100×130]	100×130	78

図10に実験回路図を示す。スイッチを切り替えることでNT-PV及び各SEC-PVの出力を測定できるようにになっている。

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分間隔で繰り返して行った。

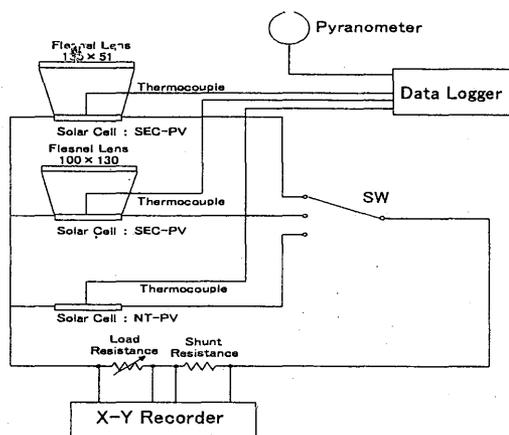


図10 実験回路図

5.3 出力向上の効果に関する検討

図11に実験当日の日射量と気温の時間変化を示す。

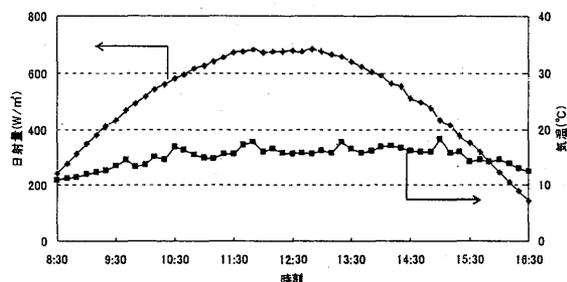


図11 日射量と気温の時間変化

図12、図13はNT-PVと各SEC-PVの出力及び太陽電池温度の時間変化についてまとめたものである。図12より、集光された光が太陽電池に寄与している時間帯においてNT-PVの出力と比べて各SEC-PVの出力は全ての条件で上回っており、集光により出力の向上が図られている。また、SEC-PV[100×51]では南中時刻付近における出力が最も大きくなり、SEC-PV[100×130]では南中時刻より遠ざかるほど出力増加が大きくなる傾向にあった。図13よりNT-PVの電池温度と比べて集光された光が太陽電池に寄与している時間帯において各SEC-PVの電池温度は常に上回っている。太陽電池温度上昇は太陽電池出力の低下につながるが、図14より、電池温度の上昇が起こっても出力比は向上していることがわかる。このことより、集光に伴う電池温度の上昇による出力低下よりも、出力向上の影響の方が大きいといえる。

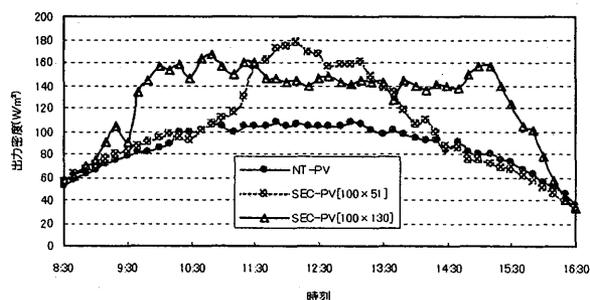


図12 太陽電池出力の時間変化

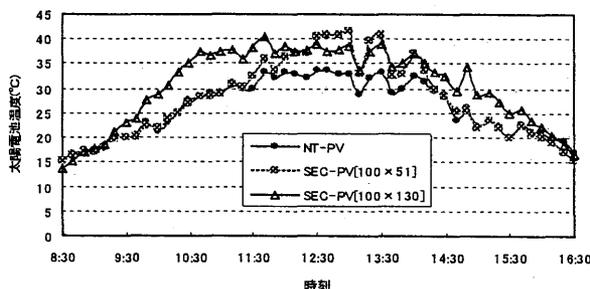


図13 太陽電池温度の時間変化

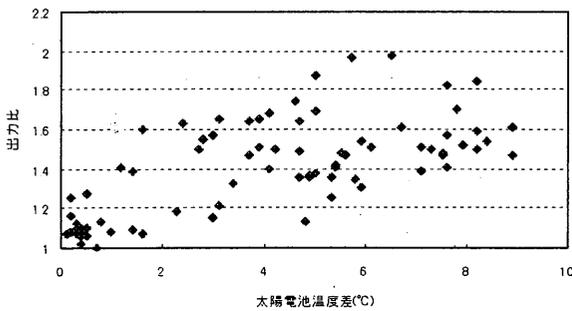


図 14 太陽電池温度差と出力比の関係

5.4 集光条件下における曲線因子の検討

曲線因子とは最大出力を開放電圧と短絡電流の積で除した値であり、太陽電池としての電流電圧特性曲線の良さを表すパラメータで、理想状態の太陽電池出力にどれだけ近いかを示した指標であると考えられる。

図 15 に 12 時 40 分における各太陽電池の電流－電圧特性曲線を示し、図 16 に曲線因子と時間変化の関係をまとめたものを示す。図 15 及び図 16 より、集光条件下において I_{sc} は増加するが V_{pmax} が低下し、 I_{pmax} も I_{sc} ほど増加せず、その結果曲線因子が減少してしまうことから集光条件下では太陽電池の性能は低下していると考えられる。

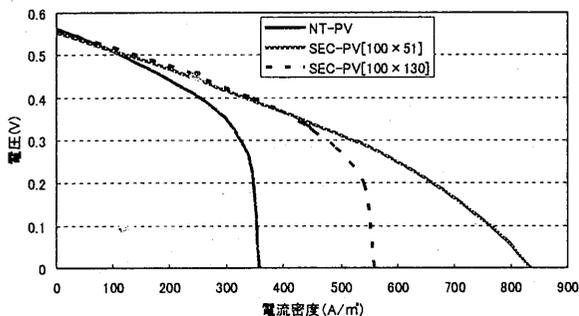


図 15 各太陽電池の電流電圧特性曲線

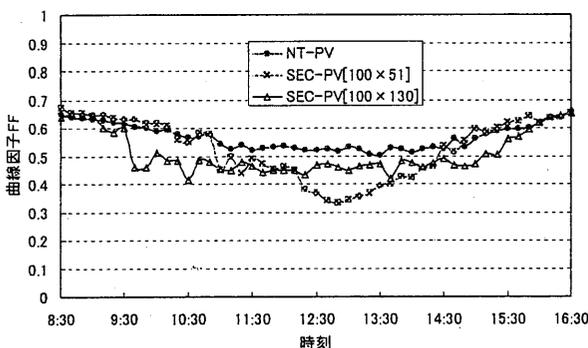


図 16 曲線因子の時間変化

集光することで受光量が增大するので太陽電池の短絡電流は増加するが、その結果として曲線因子が低下し、集光比が大きくなるにもかかわらず出力が増加しにくくなるため、日射量が高くなる南中時刻付近で集光比が高くなるように設置するより南中時刻を挟んで日射量の低くなる時間帯において集光比が高くなるように L 型フレネルレンズを設置したほうがより効果的であると言える。

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) 太陽電池と L 型フレネルレンズの最適設置距離を求める式を導出し、太陽電池のサイズと L 型フレネルレンズのサイズ及び焦点距離が決まれば最適設置距離を求めることができることを明らかにした。
- (2) フレネルレンズ集光方式において、集光により電池温度が上昇して太陽電池の出力が低下するが、その影響よりも、集光による太陽電池出力向上の効果の方が大きいことが明らかになった。
- (3) L 型フレネルレンズ集光方式では受光量が增大するので太陽電池の短絡電流が増加するが、その結果として曲線因子が低下し、集光比が大きくなるにもかかわらず出力が増加しにくくなるため、日射量の高い南中時刻付近に合わせて設置するより、日射量の低い時間帯に合致させるように設置したほうがより効果的であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岩切敏哉 他 4 名：「集光による太陽光発電の出力向上の基礎検討」，電気学会 D 部門合同研究会，2004.6
- 2) 岩切敏哉 他 4 名：「フレネルレンズと太陽電池の最適設置距離の検討」，電気関係学会九州支部連合大会，2004.9
- 3) 日本太陽エネルギー学会：「太陽エネルギーの基礎と応用」，オーム社，1979.9
- 4) 山田興一 他 2 名：「太陽光発電工学 ～太陽電池の基礎からシステム評価まで～」，日経 BP 社，2002.10
- 5) 桑野幸徳：「新・太陽電池を使いこなす」，講談社，1999.3