

# 簡易な集光装置を取り付けた太陽電池モジュールの 発電出力シミュレーション

## Numerical Analysis of Power Output of PV Module with Portable Sunlight Concentrator

梅森隆文 \*1  
Takafumi UMEMORI

西村 亮 \*2  
Ryo NISHIMURA

西守克己 \*3  
Katsumi NISHIMORI

石原永伯 \*4  
Naganori ISHIHARA

### Abstract

In this paper, we improved the performance of a relatively small commercial PV module by using a portable well-shaped sunlight concentrator. The concentrator is composed of four isosceles trapezoid walls. The shape of the concentrator is optimized in order to maximize the generated power of a PV module. It is shown that the daily power output can be improved by about 50% by using the concentrator of which wall reflectance is 60%. This also means that the material of which reflectance is not so high, such as aluminum-metallized tape usually sold at do-it-yourself stores, can be used as reflective surfaces of the concentrator. This also means that the power output of a PV module can be improved at low cost.

キーワード：太陽光発電，集光装置，発電電力，形状最適化

Key Words : photovoltaic power generation, sunlight concentrator ,power output, shape optimization

### 1. はじめに

太陽エネルギーはエネルギー密度が小さいため、発電システムに応じた設置面積が必要になり、現時点では既存の発電方法等と比べ、コストが割高になるなどの問題がある<sup>(1)</sup>。そこで、集光により太陽電池モジュール1枚あたりの発電電力を向上させることができれば発電コストの削減につながる。本研究では、アウトドア用または災害時などの電力源としての小型太陽電池モジュールに対し、複雑な構造を必要とせず、既製の太陽電池を用いることができる集光・発電システムを提案し、シミュレーションによってその有効性を検討した。

### 2. 井戸型集光装置

本研究では、太陽電池1枚あたりの発電電力を増加させる方法として、「井戸型集光装置」を用いた場合の発電電力につ

いて検討を行った。著者らの研究グループでは、以前にこの集光装置を用いて実際に測定を行いその有効性を確認している<sup>(2)</sup>。今回は、シミュレーションにより集光装置の最適形状を検討する。

井戸型集光装置は、図1のような同一寸法の等脚台形の鏡面をもち、これを4枚組み合わせた筒状のものである。これは、開口部から入射した太陽光が反射を繰り返して、底面の太陽電池に到達する構造になっている。ここで、集光倍率とは開口面積/底面積で定義する。また、開口角度は底面と集光装置側面との角度である。この集光倍率と開口角度の片方を固定してもう一方を変化させることにより集光装置の形状を決定していく。

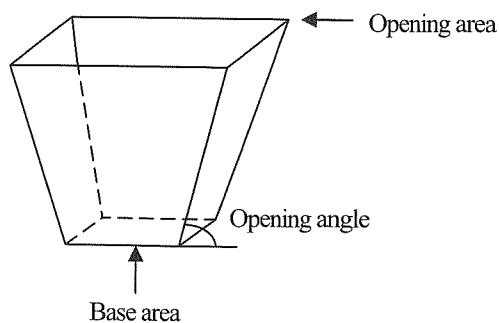


Fig.1 Schematic design of a well-shaped solar concentrator

図1 集光装置の概略図

\*1 鳥取大学大学院工学研究科院生  
(〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)  
e-mail : b03t3001@faraday.ele.tottori-u.ac.jp

\*2 鳥取大学工学部准教授

\*3 鳥取大学工学部教授

\*4 鳥取大学工学部技術職員  
(原稿受付：2008年1月10日)

### 3. 発電出力シミュレーション

井戸型集光装置に入射した太陽光による太陽電池モジュール上での日射強度分布を計算した。その結果より、PSpiceを用いてシミュレーションを行い、太陽電池の発電出力を算出した。

#### 3.1 日射強度分布計算プログラムの概略

今回使用した日射強度分布計算プログラムは、著者らの研究グループが作成したものであり、集光装置底面の一边の長さ(太陽電池モジュールの一边の長さ)、集光倍率、壁面での反射率および太陽光の入射角度を用いて底面での日射強度分布を計算できる。今回は仰角及び方位角を変化させ、シミュレーションを行った。ここで仰角とは図2に示すように地平線と太陽のなす角度のことを表しており、方位角とは南を0°として、時計回りに定義し、西が90°北が180°東が270°となる。また、傾斜角は南中時に太陽光が垂直入射するように設定している。

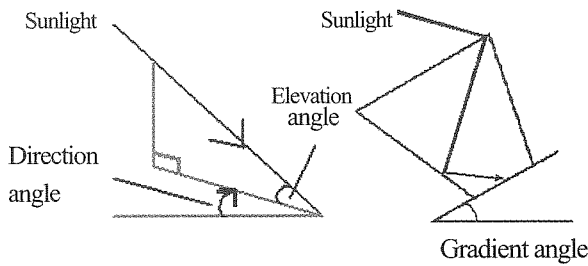


Fig.2 Definition of parameters  
図2 各種パラメータの定義

#### 3.2 実験方法

本研究で想定した太陽電池モジュールは有効受光面積が230mm×230mmであり、この中に24mm×52mmのセルが縦に8枚、横に4枚配置される。これは市販の単結晶モジュールBT832-MRN((株)昭和セル石油)とほぼ同等の寸法、セル配置である。

この太陽電池モジュールを図3のように太陽電池セルを32枚直列接続した簡易な等価回路で表す。

この等価回路について、それぞれの電流源に各セルの日射強度に比例した数値を与えて、負荷を変化させて最大発電電力を求める。シミュレーションに用いた回路素子を表1に示す。

集光した場合の各セルに代入する電流源の値は、集光していない場合の垂直に入射する日射強度を基準としているため、シミュレーションで求めた日射強度分布を32の領域に分割し、式(1)のようにして求める。

(例) 日射強度シミュレーションによって得たあるセルの平均の日射強度が3.45の場合

$$3.45 \times 0.005 = 0.01725 \text{ [A]} \quad (1)$$

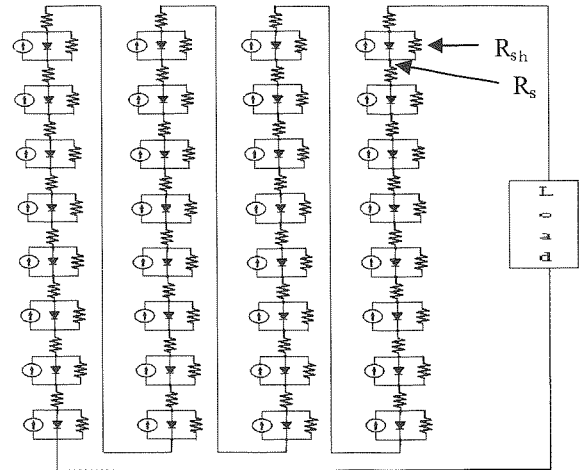


Fig.3 Equivalent circuit of assumed PV module  
図3 太陽電池モジュールを想定した等価回路

なお0.005[A]はシミュレーションで用いた電流源の電流値である。また、セルに光が斜めに入射する場合、集光しない場合の日射強度は式(2)のようになる。

(例) セルへの入射角が50.5°の場合

$$\sin(50.5^\circ) \times 0.005 = 0.003858 \text{ [A]} \quad (2)$$

Table.1 Circuit element used by simulation

表1 シミュレーションで使用した回路素子

Diode	Si diode
Resistor	$R_{sh}=3.75 \text{ k}\Omega$ , $R_s=31.25 \Omega$
Current source	0.005A for non-concentration case

#### 3.3 1日の発電出力シミュレーション

装置の方位角を0°、傾斜角度を35°、集光板の反射率(60%)モジュール底面の面積を固定し、集光倍率のみを変化させた場合と開口角度のみを変化させた場合の1日の発電電力を計算し、集光装置の最適な形状を検討した。なお、傾斜角の設定は南中時に太陽電池モジュールが垂直入射するように設定した。

##### 3.3.1 集光倍率を変化させた場合の発電出力特性

集光倍率を変化させた場合の3月21日の鳥取における発電出力シミュレーションを行なった。シミュレーション条件を表2に示す。

Table.2 Numerical conditions for fixed opening angle(80°)

表2 開口角度(80°)を固定した場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	2, 3, 4, 5
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	80
Angle of gradient of module [deg]	35

集光倍率を変化させた場合の発電出力特性を図4に示す。集光せずに発電した場合の最も発電電力が大きかった12:00の発電電力を基準とし電力比を取っている。図4より集光倍率が低くなるほど発電開始時刻が早くなる。また、無集光の場合よりも発電電力が上回る時間は集光倍率が高い場合の方が早いことがいえる。これは、反射板によって入射される太陽光が、集光倍率が高い場合には、開口面積が広いため、多くの光を太陽電池に導くことができるためではないかと考えられる。そして、高い集光倍率ほど最大電力が大きくなっていくことが分かり、また集光倍率が高くなるにつれて最大電力の増加が緩やかになる傾向があった。

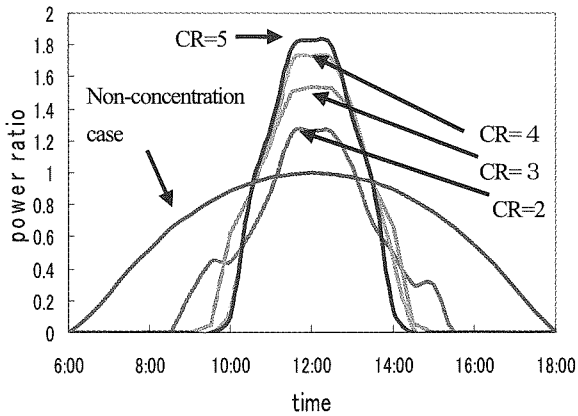


Fig.4 Generation characteristics for various concentration ratio (CR) for fixed-opening-angle case(80°)

図4 開口角度(80°)を固定した場合の各種集光倍率の出力特性

そこで、集光倍率を5倍よりさらに高い場合の発電出力シミュレーションを行ない検討する。シミュレーション条件を表3に示す。

Table.3 Numerical conditions for fixed opening angle(80°)  
表3 開口角度(80°)を固定した場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	5, 10, 20, 30
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	80
Angle of gradient of module [deg]	35

集光倍率を変化させた場合図5に示す。集光倍率が20倍までは大きくなるにつれて最大発電電力が大きくなっていくことがわかる。20倍以上になると発電電力の増加が緩やかになる事が分かる。また、低倍率の時には11:30から12:30では発電電力にあまり差が見られないが、高倍率になるとその時間帯における発電電力の違いがより顕著に現れている。

図6に1日の最大の電力比と集光倍率の関係を示す。これより、10倍以降は発電電力の増加(改善)がゆるやかになり、20倍を超えるとほとんど増加しないことが分かる。この原因と

しては、集光倍率が大きくなると反射板の上部の部分で反射された光が太陽電池に到達せず集光装置の外へ反射されてしまうことや、太陽電池に当たったとしても、反射を繰り返すことで光が弱くなり、集光の効果が得られない状態になるためほぼ一定の状態になると考えられる。

また、実際に井戸型集光装置を用いて発電を行なう場合、井戸型集光装置の構造から風の影響を受けやすく強風時には設置が困難になり、また集光した光によって太陽電池モジュールの温度が上昇することが予想され、集光倍率が高すぎると実用性に欠けてしまう。これらを考慮すると実用的な集光倍率は4倍程度と考えられる。

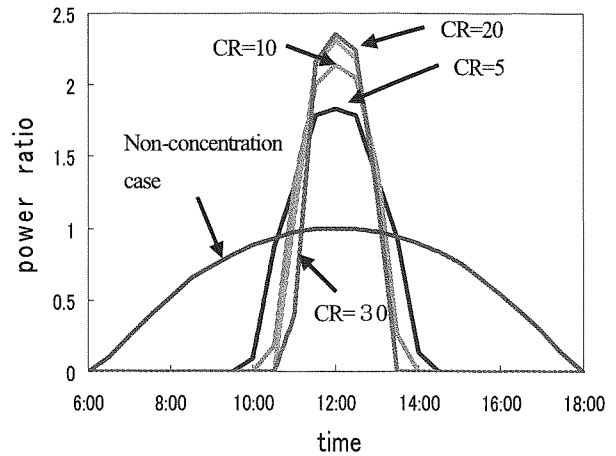


Fig.5 Generation characteristics for various concentration ratio (CR) for fixed opening angle case(80°)

図5 開口角度(80°)を固定した場合の各種集光倍率の出力特性

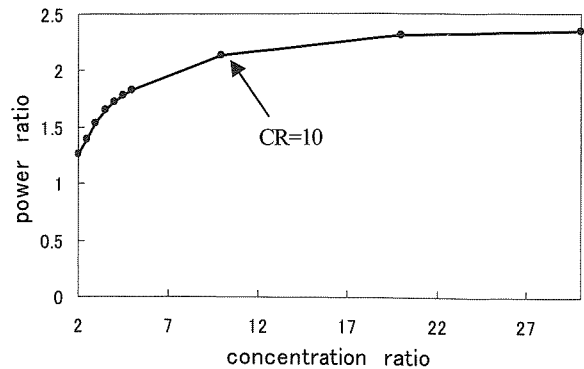


Fig.6 Relation between power ratio and concentration ratio

図6 集光倍率に対する電力比

そこで、1日の発電電力量を集光倍率4倍で行った場合と集光していない場合で比較を行った。発電電力量の算出方法は30分おきの発電電力を求め、その発電電力が30分間続くと想定して行った。11:00から13:00の発電電力量を比較すると、集光している場合の発電電力量は集光していない場合の1.57倍となった。このことにより、太陽の向きと集光装置の方向が近い時間帯に効果があることがいえる。また、1日の発電電力量を比較すると、集光している場合の発電電力量は集光し

ていない場合の0.64倍となった。このことにより南向きに固定した状態で終日発電を行うことは実用的ではないといえる。

3.3.2 開口角度を変化させた場合の発電出力特性

集光倍率を4倍に固定して開口角度を変化させた場合の3月21日の鳥取における発電出力シミュレーションを行なった。シミュレーション条件を表4に示す。

Table.4 Numerical conditions for fixed concentration-ratio (CR=4) case

表4 集光倍率を4倍に固定した場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	4
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	60, 70, 75, 80
Angle of gradient of module [deg]	35

発電電力特性を図7に示す。図4と同様に、集光せずに発電した場合の最も発電電力が大きかった12:00の発電電力を基準とし電力比を取っている。図7より開口角度が小さくなるほど発電開始時刻が早くなる。また、無集光の場合よりも発電電力が上回る時間は開口角度が小さい場合の方が早い。また、開口角度が大きいくほど最大発電電力が高くなる。これは、集光倍率が一定の場合、開口角度を大きくすると一度入射した光が反射を繰り返して装置外に逃げる割合が少なくなり、また、モジュールにほぼ垂直に入射する光が多くなったのではないかと考えられる。11:00から13:00の発電電力量を無集光の場合と比較すると、開口角度70°の場合1.57倍、75°の場合1.63倍、80°の場合1.57倍となり、単純に開口角度を大きくすれば、発電電力量が増加するとは限らないことがいえる。

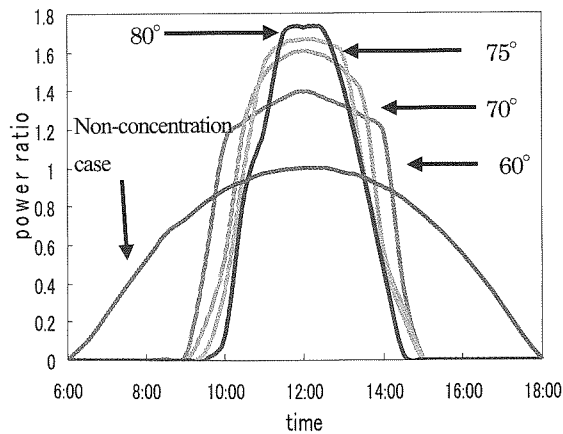


Fig.7 Generation characteristics for various opening angle for fixed-concentration-ratio (CR=4) case

図7 集光倍率(4倍)を固定した場合の各種開口角度の出力特性

4. 1日3回追尾したときの発電出力特性

これまで集光倍率と開口角度について検討を行なった結果、南向きで終日発電することは、不向きであることが分かった。そこで1日3回集光装置の向きを変えるシミュレーションを行なった。

4.1 方位角を変化した場合の発電出力

集光装置の向きを変えるということは集光装置の方位角を変えることになる。そこで、図2の方位角(Direction angle)を南向きを0°、東向きを-90°、西向きを90°として表5のシミュレーション条件で発電を行った。方位角を変化させた時刻は、10時と14時であり、例として「0°、±90°」の場合10時までが-90°、14時までが0°、14時以降は90°である。

1日の発電電力特性を図8に示す。図8より無集光の場合と発電電力量を比較すると、0°、±90°の場合1.03倍、0°、±60°の場合1.54倍、0°、±45°の場合1.44倍となった。この結果より、方位角0°、±90°の場合集光せず発電した場合とあまり変わらないがその他の方位角については1日3回追尾を行って発電することが有効であることがいえる。

Table.5 Numerical conditions for sun-tracking case

表5 太陽追尾した場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	4
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	80
Angle of gradient of module [deg]	35
Direction angle of module [deg]	0, ±90 0, ±60 0, ±45 0, ±30

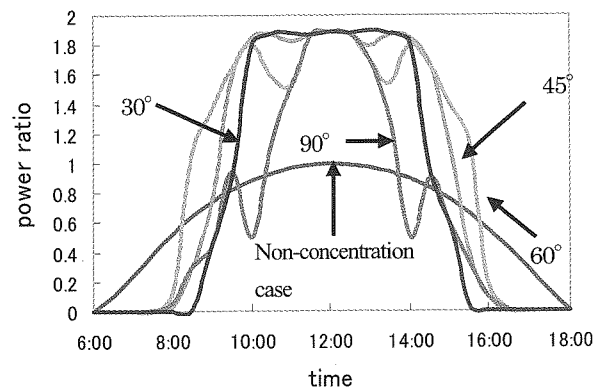


Fig.8 Generation characteristics for various direction angle for sun-tracking case. The concentration ratio is 4.

図8 集光倍率4倍で太陽追尾を行なった場合の各種方位角の出力特性

4.2 開口角度を変化した場合の発電出力

4.1 節で有効性が示された方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$  , 方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 45^\circ$  及び方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 30^\circ$  の場合に対し開口角度  $70^\circ$  から  $80^\circ$  の場合の比較を行う。

方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 45^\circ$  の場合のシミュレーション条件を表 6 に示す。

Table.6 Numerical conditions for sun-tracking case. The direction of PV module varies from  $-45^\circ$  to  $45^\circ$

表 6 方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 45^\circ$  の場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	4
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	70, 75, 80
Angle of gradient of module [deg]	35

方位角が  $0^\circ$  ,  $\pm 45^\circ$  の場合の1日の発電電力特性を図 9 に示す。集光なしの場合と1日の発電電力量の比較を表 7 に示す。開口角度  $80^\circ$  の場合が1.43倍、開口角度  $75^\circ$  の場合が1.39倍、開口角度  $70^\circ$  の場合が1.48倍となり、開口角度  $70^\circ$  の場合に高い発電電力量が得られた。

Table.7 The comparison of daily power energy

表 7 1日の発電電力量の比較

Opening angle [deg]	70	75	80
Daily power ratio	1.48	1.39	1.43

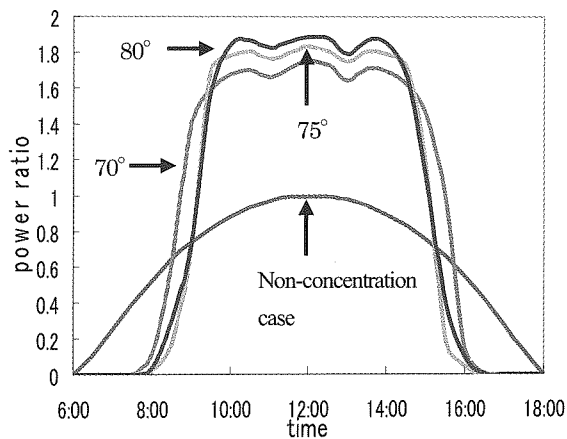


Fig.9 Generation characteristics for various opening angle for sun tracking case. The direction of PV module varies from  $-45^\circ$  to  $45^\circ$

図9 太陽電池モジュールを方位角 $-45^\circ$  から  $45^\circ$  に太陽追尾を行なった場合の各種開口角度の出力特性

方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$  の場合のシミュレーション条件を表 8 に、1日の発電電力特性を図 10 に示す。また、集光なしの場合

と1日の発電電力量の比較を表 9 に示す。開口角度  $80^\circ$  の場合が1.54倍、開口角度  $75^\circ$  の場合が1.51倍、開口角度  $70^\circ$  の場合が1.45倍となり、開口角度  $75^\circ$  と  $80^\circ$  の場合に高い発電電力量が得られた。

Table.8 Numerical conditions for sun-tracking case  
The direction of PV module varies from  $-60^\circ$  to  $60^\circ$

表 8 方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$  の場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	4
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	70, 75, 80
Angle of gradient of module [deg]	35

Table.9 The comparison of daily power energy

表 9 1日の発電電力量の比較

Opening angle [deg]	70	75	80
Daily power ratio	1.45	1.51	1.54

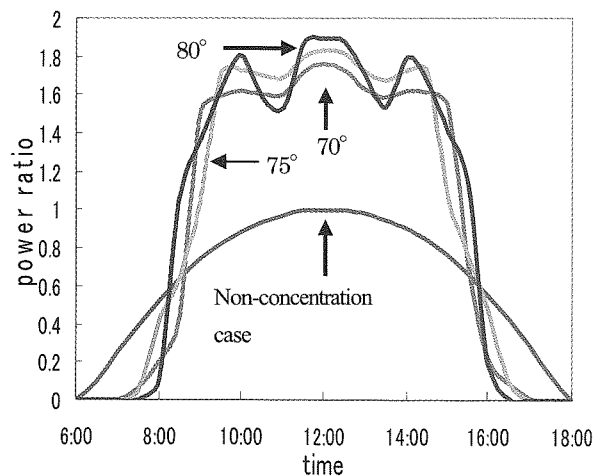


Fig.10 Generation characteristics for various opening angle for sun tracking case. The direction of PV module varies from  $-60^\circ$  to  $60^\circ$

図 10 太陽電池モジュールを方位角 $-60^\circ$  から  $60^\circ$  に太陽追尾を行なった場合の各種開口角度の出力特性

方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 30^\circ$  の場合のシミュレーション条件を表 10 に示す。

Table.10 Numerical conditions for sun-tracking case The direction of PV module varies from  $-30^\circ$  to  $30^\circ$  .

表 10 方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 30^\circ$  の場合の条件

Base area of concentrator [mm <sup>2</sup> ]	230×230
Concentration ratio	4
Reflectance [%]	60
Opening angle [deg]	70, 75, 80
Angle of gradient of module [deg]	35

方位角が  $0^\circ$  ,  $\pm 30^\circ$  の場合の 1 日の発電電力特性を図 11 に示す。また、集光なしの場合と 1 日の発電電力量の比較を表 11 に示す。開口角度  $80^\circ$  の場合が 1.25 倍、開口角度  $75^\circ$  の場合が 1.28 倍、開口角度  $70^\circ$  の場合が 1.31 倍となり、方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$  方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 45^\circ$  の場合より発電電力量の割合が小さいことがいえる。しかし、集光せず発電した場合よりは高いことからこの方位角で発電することも有効であるといえる。

Table.11 The comparison of daily power energy

表 11 1 日の発電電力量の比較

Opening angle [deg]	70	75	80
power ratio	1.31	1.28	1.25

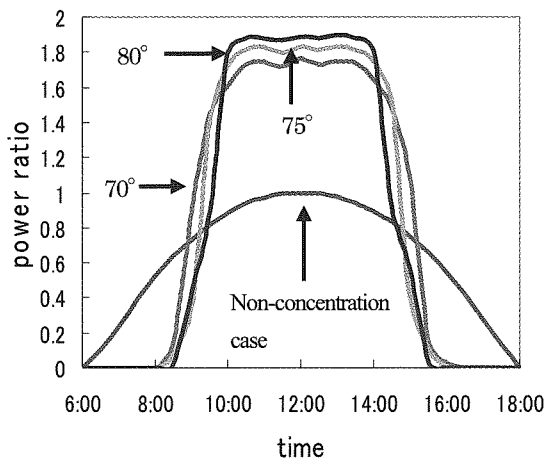


Fig11. Generation characteristics for various opening angle for sun tracking case. The direction of PV module varies from  $-30^\circ$  to  $30^\circ$  .

図 11 太陽電池モジュールを方位角  $-30^\circ$  から  $30^\circ$  に太陽追尾を行なった場合の各種開口角度の出力特性

以上より 1 日 3 回向きを変えて発電を行なうと方位角  $0^\circ$  ,  $\pm 60^\circ$  の場合が開口角度  $70^\circ$  から  $80^\circ$  で 1 日の発電電力量が高いことがいえる。

## 5. まとめ

本研究では、アウトドア用または災害時などの電力源としての小型太陽電池モジュールに対し、集光により太陽電池モジュール 1 枚あたりの発電電力を向上させる井戸型集光装置について検討を行なった。傾斜角を  $35^\circ$  に固定し、集光倍率と開口角度を変化した場合の 1 日の発電シミュレーションを行い以下の知見を得た。

- ・集光倍率 4 倍、開口角度  $70^\circ$  から  $80^\circ$  程度で良好な発電電力量を得ることができる。しかし、南向きに固定して終日発電を行うと無集光の場合より発電電力量が少なくなる。

- ・反射率 60% 程度の反射材で開口角度  $70^\circ$  ~  $80^\circ$  の集光装置を作り、1 日 3 回装置の向き(方位角)を変えることで、無集光時と比較して 1 日の発電電力量を 1.5 倍に増加させることができる。これにより、ホームセンターで市販されているアルミ蒸着テープのような反射率がそれほど高くないものでも反射材として用いることができる。

- ・井戸型集光装置の設計を行う場合、「開口角度  $75^\circ$  ~  $80^\circ$ 」のようにある程度自由度のある設計ができる。

- ・電力インフラが整備されていない発展途上国では、1 枚の太陽電池で家庭内の電気をまかなっている場合がある。本研究で得られた知見はそのような地域への太陽光発電の普及に貢献できると思われる。

今後は、シミュレーションの条件での実測を行い比較検討していく。また、南向きに設置した場合の通常のシステムと集光装置を取り付けたシステムとの年間発電量や CO<sub>2</sub> 削減量などの比較検討を行なっていきたい。

## 参考文献

- (1) 新太陽エネルギー利用ハンドブック委員会，新太陽エネルギー利用ハンドブック(2001), 164，日本太陽エネルギー学会，東京
- (2) 岸本，山根，西村，西守，石原，簡易な集光装置による太陽電池モジュールの発電電力向上，太陽エネルギー，29-3(2003), 29-34