

# 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

Improving the Performance of a PV module Using Non-expensive Sunlight Concentrators

岸本拓磨<sup>\*1</sup>  
Takuma KISHIMOTO

山根剛士<sup>\*2</sup>  
Tsuyoshi YAMANE

西村亮<sup>\*3</sup>  
Ryo NISHIMURA

西守克己<sup>\*4</sup>  
Katsumi NISHIMORI

石原永伯<sup>\*5</sup>  
Naganori ISHIHARA

## Abstract

The density of solar energy on the ground is not so high. Because of this, a large amount of solar cells are required to obtain sufficient generated power. However, PV modules are expensive nowadays. In order to diffuse the wide use of solar power generation, the cost of the power generation should be reduced. If the generated power from a PV module can be increased to twice larger than conventional value without using expensive equipments, the cost of the solar power generation can be reduced to about half the conventional value. In this research, aiming to improve the performance of a PV module, we concentrate the sunlight to a PV module. The sunlight was concentrated on a commercially-available PV module by using low-priced aluminum-metallized tape. We measured the characteristics of the "concentrating module". We show that the generated power can be increased to 2.7 times larger than using conventional (non-concentrating) module case.

キーワード：太陽光発電、太陽電池モジュール、発電出力、集光、発電コスト

Key Words : Photovoltaic power generation, PV module, Power output, Sunlight concentration, Cost of power generation

## 1. はじめに

現在、地球環境問題の観点からクリーンで非枯渇なエネルギー資源である太陽光発電の技術開発と利用技術の向上が課題となっている。また、太陽エネルギーはエネルギー密度が低く、高効率化、低コスト化が求められている。例えば、コストをほとんどかけずに太陽電池モジュールの発電電力を2倍にすることができるれば、発電コストは1/2となることが予想される。これまでにも例えば太陽電池モジュールに入射後、発電に寄与せずに反射してしまう太陽光を鏡を使って再入射させて再び太陽電池モジュールに送ることによる「光閉じ込め型モジュール」<sup>(1)</sup>や太陽光を500倍～1000倍に集光させる集光装置<sup>(2)</sup>などの研究が行われている。本研究では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・発電システムを試作し、発電特性を測定したので報告する。

## 2. 予備実験

太陽光を反射させる反射面に用いる材質には種々のものがあるが、ここでは「安価、入手の容易さ」を念頭におき、ホームセンター等で市販されているアルミ蒸着テープ(株式会社ニトムズ J3070)を鏡面に用いた。このテープは反射率が極めて高いとは言い難いが、このテープを用いて本報で報告する手法で十分な発電が行われた場合、反射率の高い材質を用いれば発電性能はさらに向上するであろう。

まず、アルミ蒸着テープによる太陽光の反射でPVモジュールへの集光が良好に行えることを確認するための予備実験を行った。平板にアルミ蒸着テープを貼り(反射部有効面積890mm×1170mm)、太陽電池モジュール(昭和ソーラーエネルギー株式会社 GT434 性能をTable1に表示)に集光してモジュールのI-V特性を測定し、集光を行わない同一のモジュールと比較した。実験の概略図をFig.1に示す。I-V

\*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 : b97t3030@maxwell.ele.tottori-u.ac.jp

\*2 鳥取大学大学院工学研究科院生

\*3 鳥取大学工学部講師

\*4 鳥取大学工学部教授

\*5 鳥取大学工学部技官

(原稿受付: 2002年8月23日)

特性を Fig.2 に示し、I-P 特性を Fig.3 に示す。この日の日射強度は  $0.86\text{ kW/m}^2$  である。これらの図より、最適動作点における発電電力は 1.4 倍になり、反射面の面積が十分大きければアルミ蒸着テープは反射材として利用できると考えられる。

Table1. Standard characteristics of PV module GT-434.

Solar cell element	Single crystal silicone
Rated power output [W]	12
Voltage at rated power output [V]	16.3
Current at rated power output [A]	0.75
Open-circuit voltage [V]	20.4
Short-circuit current [A]	0.8
Size of solar cell module [mm]	378 × 349 × 35
Weight of PV module [kg]	2

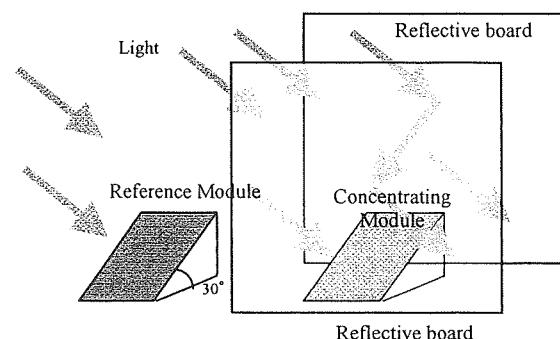


Fig.1. Schematic view of exploratory experiment.

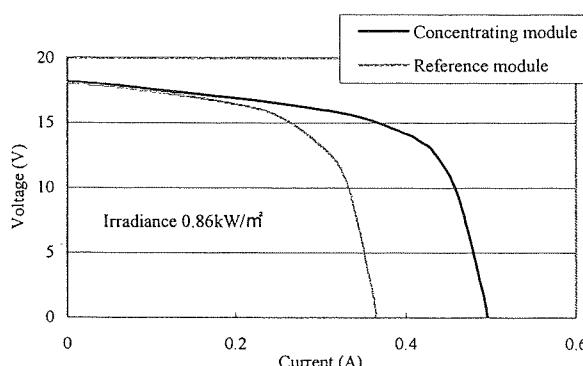


Fig.2. I-V characteristics of PV module with plate-type concentration mirror.

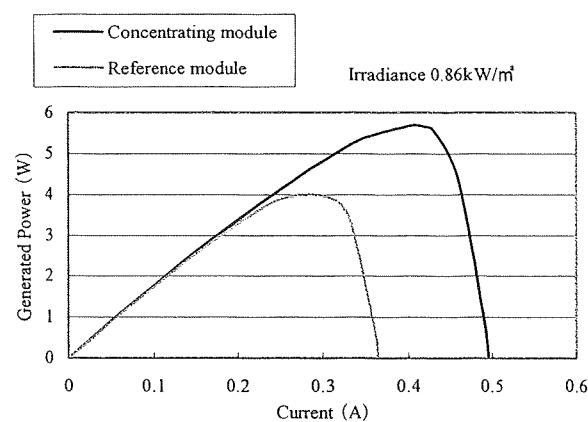


Fig.3. I-P characteristics of PV module with plate-type concentration mirror.

### 3. 集光システム

本研究では、集光装置として「パラボラ型集光装置」と「井戸型集光装置」を作成し、性能を比較した。両装置には、Table2 に示す太陽電池モジュール（BT-832-MRN 昭和シェル石油（株）製）を取り付けて、発電電力等を測定した。

Table2. Standard characteristics of PV module BT-832MRN.

Solar cell element	Single crystal silicone
Rated power output [W]	5.4
Rated open circuit voltage [V]	18.9
Rated short circuit current [A]	0.38
Size of solar cell module [mm]	247 × 293 × 14
Weight of PV module [kg]	0.7

#### 3.1 パラボラ型集光装置

パラボラ型集光装置は Fig.4 に示す構造をもつ。この装置の反射面は傘の内側に前述のアルミ蒸着テープを接着したものである。太陽からの入射光を直接受ける基準モジュールと、鏡面からの反射光のみが入射する集光モジュールが図のように取り付けられている。集光モジュールは、集光によって高温になることが予想されるためアルミ製、循環型水冷式の冷却装置（Fig. 5）を取り付けた。装置の集光比を本論文では「開口部面積のうち、モジュールに到達する太陽光が入射する面積と太陽電池モジュールの面積の比」と定義する。この集光装置では集光モジュールを発電電力が最大になる位置に配置したが、そのときパラボラに入射した光の一部はモジュールに到達しなかった。この鏡面の「無効領域」を考慮すると、この装置の集光比は 1 : 4 であった。

### 3.2 井戸型集光装置

井戸型集光装置は Fig.6 に示す構造をもつ。この装置の反射面は同一寸法の等脚台形にアルミ蒸着テープを接着したもので 4 枚組み合わせたものである。これは、入り口から入射した太陽光が井戸内で反射を繰り返し太陽電池に到達する構造になっている。この装置の開口部は、モジュール面積の 4 倍であるので集光比は 1 : 4 である。

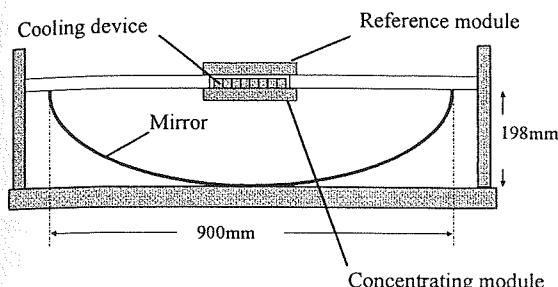


Fig.4. Schematic design of a solar concentrator by using a parabolic reflector.

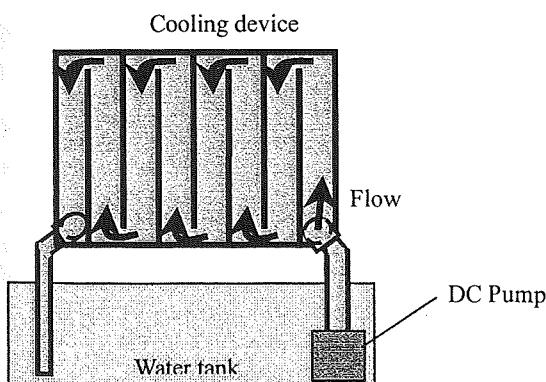


Fig.5. Schematic design of the cooling device.

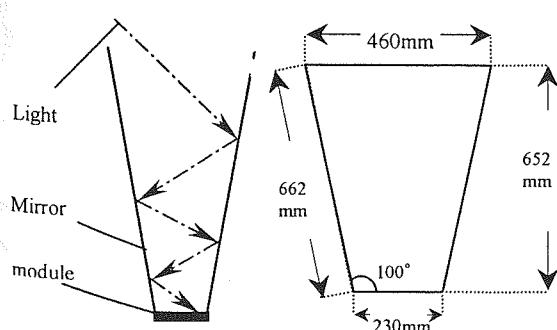


Fig.6. Well-shaped solar concentrator.

### 4. 実験方法

#### 4.1 測定場所および測定項目

測定は快晴の日を選び、鳥取大学工学部電気電子工学科棟屋上にて行った。測定項目は、各モジュールの発電電力、各モジュールの温度、日射量、冷却水水温である。なお、モジュールの裏面温度をモジュール温度とする。

#### 4.2 パラボラ型集光装置

Fig.4 に示すように、反射面から太陽光の反射光を受ける「集光モジュール」と、それと反対に取り付けられ、太陽光をそのまま受光する「基準モジュール」の発電電力、モジュール温度、日射量を測定する。測定は、冷却を行わない場合と行った場合の二通り行う。また追尾システムは未製作のため、今回は手動制御で太陽追尾を行った。

#### 4.3 井戸型集光装置

実験は、井戸型集光装置を用いた「集光モジュール」と、集光を行わない「基準モジュール」の 2 枚の太陽電池モジュールを用いて、手動で太陽の追尾を行いながら両モジュールの発電電力を測定した。また、両モジュールおよび集光装置を真南、仰角 40° に固定して、日射量、両モジュールの発電電力、モジュール温度を測定する実験も行った。

### 5. 測定結果および考察

パラボラ型集光装置を用いた実験結果を Table3, Fig.7, Fig.8 に示す。Table3 は、2001 年 12 月 5 日の快晴、無風におけるパラボラ型集光装置を用いて集光を行った場合の結果である。冷却を行ったものと行わないものの比較も同時に行なった。なお、発電電力比は、集光発電電力と基準発電電力の比として求めた。Table3 から、非冷却時では集光を行う場合と行わない場合では、集光を行った場合のほうが 1.7 倍出力を多く得られていることがわかる。また、集光とモジュール冷却を同時にすることにより 1.8 倍の出力を得られることがわかる。したがって、この実験の結果から集光と同時に冷却を行うと、集光のみの場合に比べ若干出力が増大しており、集光だけでなく、冷却も同時に行った場合のほうが発電電力の増加が大きいことがわかる。しかし、冷却にかかる電力を考慮すると、冷却による出力の向上よりも冷却にかかる電力（本研究で用いた冷却用 DC ポンプの消費電力 9.6W）のほうが大きかった。そのため、冷却の有効性は通水のための必要電力などを考慮して判断する必要がある。

Table3. Improvement of the power output of the PV module by using a parabolic solar concentrator.

		Average of generated power (W)	Average of module temperature (°C)	Irradiance (kW/m <sup>2</sup> )	Ratio of generated power
Non-cooling	Concentrator module	3.2	38.0	0.71	1.7
	Reference module	1.9	36.9		
Cooling	Concentrator module	4.1	20.7	0.79	1.8
	Reference module	2.3	31.5		

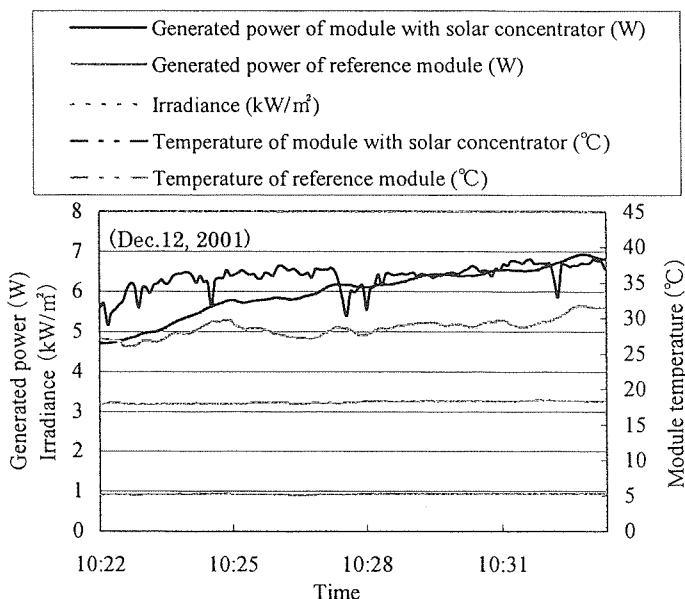
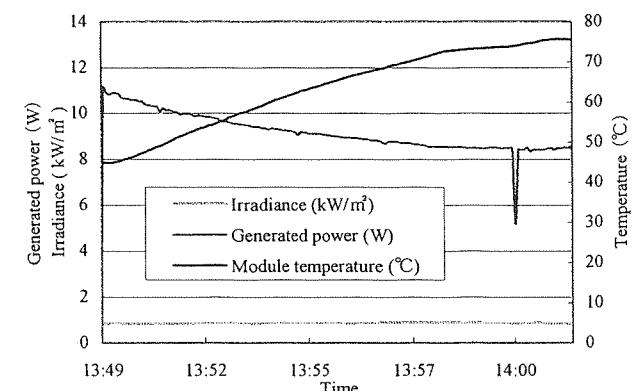
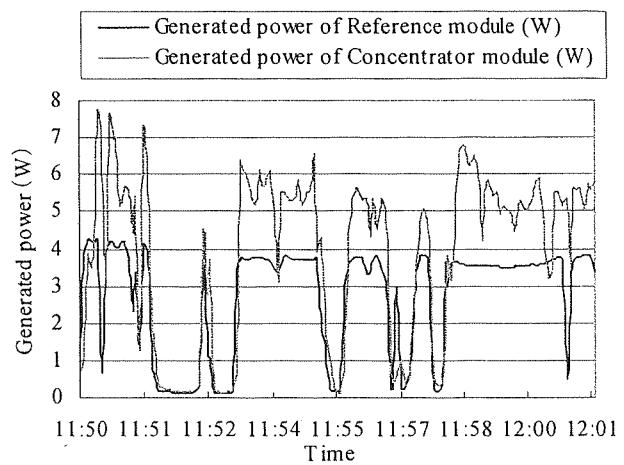


Fig.7は、2001年12月12日のパラボラ型集光装置の測定結果であるが、こちらもパラボラ型集光装置によって、集光モジュールの発電電力は、基準モジュールの約2倍となっていることがわかる。この日の測定時はほぼ無風状態であった。一方、強風が吹く場合の発電出力の例をFig.8に示す(測定日2001年9月12日)。Fig.8はFig.7に比べ、明らかに発電電力が大きく変動している。Fig.8は、日射強度の変動により、基準モジュールの発電電力も大きく変動しているが、基準モジュールの発電電力がほぼ一定、すなわち日射強度がほぼ一定である時間帯(11:58~12:00等)においても集光モジュールの発電電力が大きく変化していることが確認できる。パラボラ型集光装置は、パラボラ型鏡面の焦点に太陽電池モジュールを配置できることを前提に設計する必要がある。パラボラ型集光装置の太陽電池が、太陽と反対方向を向いているため、風などの影響により鏡面部分の角度にズレが生じ、発電電力が大きく変動することがこの原因であると思われる。また、この装置は角度調節が難しいなどの問題があることから、装置の改良が必要であると考えられる。



そこで、制御が容易で単純な構造をもち低コストである井戸型集光モデルを試作し、パラボラ型との性能の比較を行った。

Fig.9、Table4は、2001年12月12日における井戸型集光装置を手動追尾を行いながら集光を行った場合の測定結果である。図の日射量は基準モジュールの日射量を示している。図の14:00頃の発電電力が低下している点は、測定時に誤って入射光を遮断してしまったことによると考えられる。図より、井戸型集光装置はパラボラ型集光装置に比べ、発電電力の変動が少なく安定していることがわかる。

Table4 の発電電力の値は、モジュール温度の上昇による発電効率の低下が收まり、安定した発電電力が得られるようになったときの値である。Fig.9 の発電電力が 8.5W に収束していることが確認できる。また、発電電力比は集光発電電力と基準発電電力の比である。図より、井戸型集光装置は、基準モジュールと集光モジュールの発電電力の差は最大で 4.0 倍、平均すると 2.7 倍の発電電力の向上が確認でき、Table3 と比較して明らかにパラボラ型集光装置よりも発電電力の増大が大きいことから、パラボラ型より集光能力が向上していることがわかる。しかしパラボラ型に比べ、モジュール上の温度が 75.5°C と非常に高温であり、モジュールの温度上昇に伴って発電効率が低下していることがわかる。このような 70°C 超の高温の状況下で使用を続けるとモジュールの寿命に影響を与えることも考えられる。

Fig.10(a)、Table5 は、2002 年 2 月 6 日の井戸型集光装置を真南、仰角 40° に固定して日の出から日没まで測定を行った結果である。Fig.10(a)より固定式でも 11 時頃から 15 時頃の間では集光の効果が十分あることがわかる。特に効果のある 11 時 30 分から 14 時 30 分の間の集光モジュールと基準モジュールの発電電力比は 2.9 倍であった。この装置を用いて追尾を行うとすれば最低、一日 3 回程度、装置の角度を変えればよいと考えることができる。また、図の 11 時 45 分から 14 時頃にかけて発電電力がほとんど変わっていないことがわかる。Fig.10(b)にモジュール温度 25 度のときを基準として温度補正（モジュール温度 1 度上昇につき発電効率 0.5% 低下）を行ったグラフを示す。この図より、温度補正後の発電電力は 12 時頃から 14 時頃の 2 時間程度ほぼ一定になっていることがわかる。太陽電池モジュールの受光面に太陽光が一様に入射しているのならば、日射強度が最大となるときに発電電力も最大となる（ピークを持つ）はずである。このことから、井戸型集光装置によって集められた太陽光の強度はモジュール受光面上では一様ではなく、分布を持っていると考えられる。

Table4. Integral values of the generated power and the temperature of the sun-tracking PV module with well-shaped solar concentrator.

	Generated power (W)	Temperature (Max) (°C)
Reference module	3.2	45.4
Concentrating module	8.5	75.5
Maximum ratio of instantaneous generated power (Concentrating / Reference)		4.0
Average ratio of generated power (Concentrating / Reference)		2.7

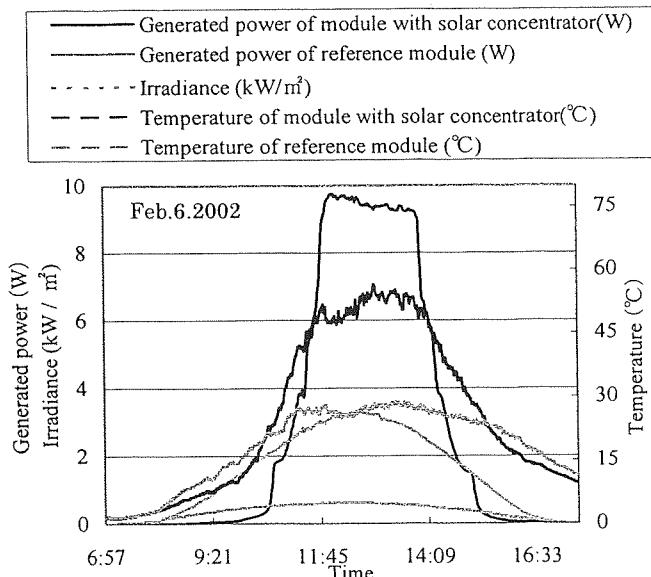


Fig.10(a). Time variations of the generated power and temperature of the fixed PV module with well-shaped solar concentrator.

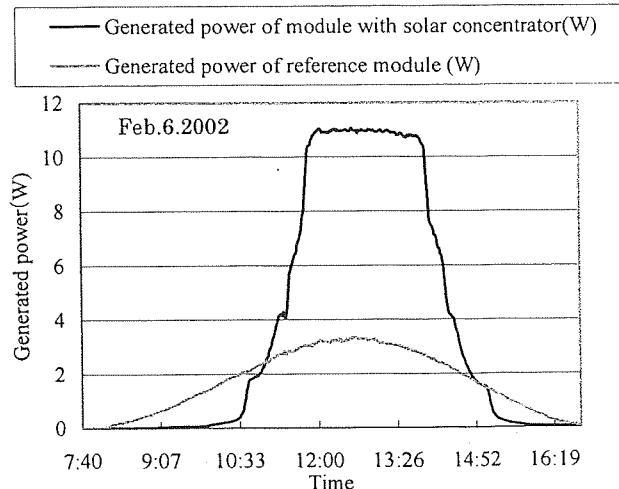


Fig.10(b). Time variations of the generated power (with temperature correction at 25°C) of the fixed PV module with well-shaped solar concentrator.

Table5. Integral generated power of the fixed PV module with well-shaped solar concentrator (Feb.6.2002).

Integral generated power of Concentrating module (Wh)	29.3
Integral generated power of Reference module (Wh)	15.5
Ratio of integral generated power (Concentrating / Reference)	1.9
Maximum ratio of instantaneous generated power (Concentrating / Reference)	3.5

Table5より、装置を一日中固定させた場合も集光を行ったほうが最大電力として3.5倍、1日の発電電力量として1.9倍の増大があったことがわかる。

## 6. まとめ

本研究は、太陽電池モジュールの発電電力の向上および発電コストの低下を目的とし、パラボラ型集光装置と井戸型集光装置（ともに集光比1:4）を試作し、評価を行った。パラボラ型モジュールは、モジュールの冷却を並行して行うことによって既存のモジュールの2倍の発電電力を得ることができた。しかし、実際に測定を行うと、太陽追従制御の難しさや、集光性能に問題があることがわかった。そこで、制御が簡単で低コストである井戸型集光モデルを試作した。井戸型集光モデルでは、簡単な手動追尾によって、発電電力を2.7倍に増加させることができた。また、装置を一定の角度に固定して測定を行った場合でも一日平均で約1.9倍の発電電力量を得ることができた。井戸型集光装置の集光比は1:4であり、4倍の面積を要しているのに対して温度上昇および受光面での光量の不均一などの影響により発電電力が3倍弱に留まっているが、この井戸型集光装置はアルミ蒸着テープなどの極めて安価な材料で製作することができる、換言すればわずかなコストで発電電力を約3倍にできるので、この集光装置を用いる事により発電コストの削減が可能であると考えられる。

本論文で述べたパラボラ型集光装置および井戸型集光装置のような鏡などの幾何光学系を用いた太陽光集光システムには、散乱光の利用率が大幅に低減するという欠点がある。Fig.10の10:30以前と15:00以後の出力が基準モジュールと比べて大きく下回っているのは、直達光が存在しないためだけでなく、散乱光を集光できないことも大きな要因であると考えられる。しかし、装置を完全固定して測定を行った場合でも、このような快晴日には一日の総発電電力量は基準モジュールの1.9倍に増加している。よって、井戸型集光装置は装置を固定した場合でも、快晴日には一日の総発電電力量が増加しており、散乱光の利用率低下が問題とならないような用途に対しては有効であると考えられる。

平板の太陽電池モジュールに井戸型集光装置を取り付けることにより、設置に必要な空間領域が大幅に増加する。このため、住宅用システムなどの恒常的設備としては設置が困難となる場合があり得る。また、太陽追尾を行う場合には可動部の長期信頼性などを考慮しなければならない。しかし、太陽電池モジュールの寸法がそれほど大きくなく、恒常的に屋外に放置する必要のない場合、たとえばアウトドア用の電

気機器の充電用電源として日照時のみ太陽電池を用いるような場合には一時的に高い発電電力を得て充電時間の短縮をはかることができる。また必要に応じて（手動で）太陽を追尾することにより、さらに高い発電電力が期待できる。したがってこのような目的に対しては安価な装置を用いて太陽電池モジュールからの出力を増大させることが可能であり、十分有効なシステムとなることが考えられる。また、この井戸型集光装置は折りたたむことができるので、可搬性も高い。著者らはソーラーカー（Fig.11）の研究も行っているが、この自動車の充電システムは走行中に充電するものではなく、停車時にモジュールを広げて充電するものである。このようなシステムに井戸型集光装置を取り付けた場合、充電時間の短縮などの利点が考えられる。また、このシステムの充電時間を2~3時間とすれば太陽の角度が変化したとしても装置を固定したままで十分集光が可能であり、散乱光を集光できないことなどの欠点もそれほど問題ではないと考えられる。

今後は、集光装置の最適形状についての考察を行って最適なモデルの設計をする必要がある。

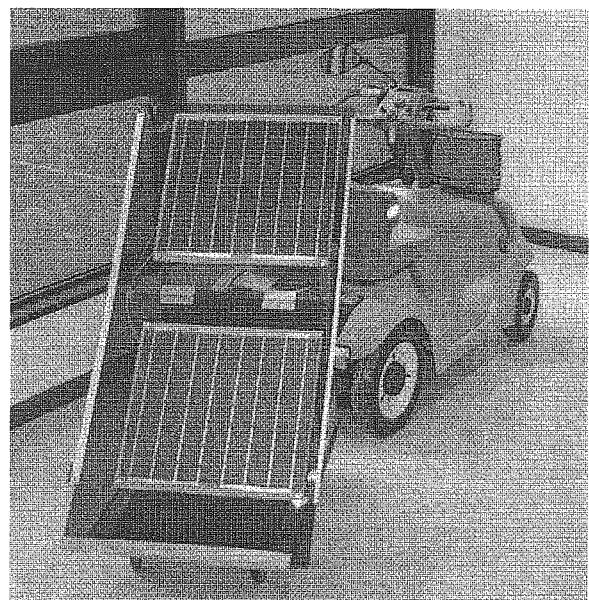


Fig.11. Solar car

## 参考文献

- (1) 土屋、吉岡、齊藤：光閉じ込め型太陽電池モジュールの高性能化、日本太陽エネルギー学会誌 Vol.27, No.1, pp.77-84, 2001年1月
- (2) S. M. Sze : Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., pp. 830-835