

■ 技術報告 ■

太陽追尾光発電

Sun-tracking Photovoltaic Power Generation

今 仁 和 武*・知 念 正 紀**

Kazutake Imani Masanori Chinen

1. はじめに

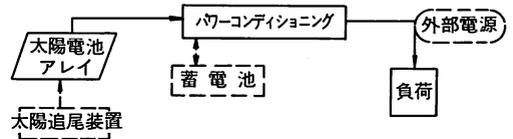
太陽光発電システムは、太陽光エネルギーを太陽電池で電気に直接変換するシステムである¹⁾。このシステムを電力供給源として実用化するために、太陽電池の高効率化(低コスト)とシステム構成を最適化する研究開発が日米を中心として進展している。太陽電池モジュールは、多数のセルを直列にした集合体であり、アレイはモジュールを一体化したセットである。

太陽電池アレイの設定方式は、従来は固定式(真南に約30度傾斜)が多かったが²⁾、日射量を有効に利用するために太陽を追尾するには、太陽センサ法と計算機制御法がある³⁾。しかし、計算機制御法は小規模なシステムには高価となり、センサ追尾法は晴天日以外は使用できない⁴⁾。新追尾法としての影追尾光発電装置は、アレイの西側下部に追尾用の太陽電池パネルを設置して東西追尾し、南北下部に1対の追尾パネルを増設して南北追尾するのが特長である⁵⁾。実験に使用したアレイの太陽電池容量は1kWであり、追尾用モジュール(3枚)は30Wである。ここではこの新しい太陽追尾機構の実施例を紹介して、従来の制御方法と比較する。

さらに、米国のIEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers)の太陽光発電専門家会議(1985年10月)で発表された論文を中心として、集光式モジュールと宇宙用光発電の現状を紹介する。最後に、太陽追尾による年間の積算日射量を計算して、地上での追尾の効果を検討する。

2. 太陽追尾方法

太陽光発電システムは、図-1と表1に示すように太陽電池アレイ、パワーコンディショニング(インバー



注) 破線内は追加装置

図-1 太陽光発電システムの構成

表1 太陽光発電システムの分類

| | モジュール | アレイ | 実施例 |
|-----------|----------|-------------------|--------------------------------------|
| 太陽光発電システム | 非集光形太陽電池 | 固定式 | MIT ¹⁾ |
| | | 1軸追尾式 | オーストラリア ⁶⁾ |
| | | 2軸追尾式 | 筑波大 ⁴⁾ , 日立 ⁵⁾ |
| | 集光形太陽電池 | 低集光平板式 | ARCO Solar ³⁾ |
| | | フレネルレンズ式 | サウジアラビア ⁸⁾ |
| 高集光反射鏡式 | | TRW ⁹⁾ | |

表2 太陽追尾方式の比較

| | 作動原理 | 追尾誤差 | コスト | 実施例 |
|-----|------------------------|-------|-----|--|
| 計算機 | 太陽位置を計算し、プログラム制御 | ±0.5° | 高 | ARCO Solar ³⁾ 日立 ⁷⁾ , サウジ ⁸⁾ |
| センサ | 1対の光センサの信号を比較して、アナログ制御 | ±1° | 中 | 筑波大 ⁴⁾ |
| 影追尾 | 追尾用太陽電池の影面積により自己制御 | ±2° | 低 | 日立 ⁵⁾ |

タ等)及び負荷で構成される。さらに、独立システムでは蓄電池、外部電源としては商用系統やディーゼル発電機がある。本章では、表2に示すように、3種の太陽追尾機構を紹介し、その性能を比較する³⁾。

2.1 計算機追尾

図-2は、電子計算機による太陽追尾機構の代表例であり、マイクロコンピュータによってパルスモータを下記のようにプログラム制御する⁷⁾。

太陽高度 α と方位角 β (真南を基準に西回りを正)は(1)(2)式で計算する。

$$\begin{cases} \sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \dots\dots\dots (1) \\ \tan \beta = \cos \delta \sin t / (\cos \delta \sin \phi \cos t - \sin \delta \cos \phi) \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

* ㈱日立製作所エネルギー研究所
〒316 日立市 森山町 1168
** ㈱日立製作所エネルギー研究所

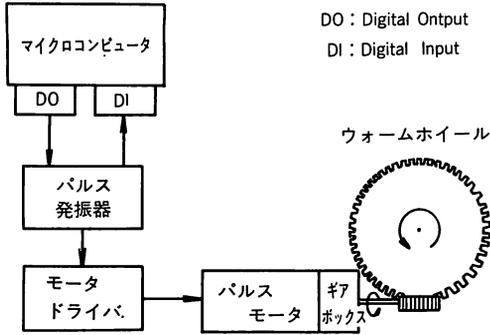


図-2 電子計算機による太陽追尾機構

ここで、 ϕ , δ , t は、緯度、太陽赤緯、時角(地方時)にそれぞれ対応する。

$$\begin{cases} \delta = 0.000504 + \cos(C)\{0.0116 \cos(C) - 0.00856 \\ - 0.00117 \cos^2(C)\} + \sin(C)\{0.408 + 0.0017(C) \\ - 0.012 \cos^2(C)\} \dots \dots \dots (3) \\ t = \pi(T - 12 + t_a + t_b) \dots \dots \dots (4) \end{cases}$$

(3)式において、 C は春分からの通算日数に対応する地球公転角(ラジアン)である。(4)式において、 T は中央標準時であり、 t_a と t_b は次式で与えられる。

$$\begin{cases} t_a = (r - 135) / 15 \\ t_b = - 0.000278 + 0.122 \cos(d + 1.49) \\ - 0.165 \cos(2d - 1.26) \\ - 0.00535 \cos(3d - 1.15) \end{cases}$$

ここで、 r は経度であり、 d は1月1日からの通算日数(m月n日)を基にした角度(ラジアン)である。

$$\begin{cases} d = 2\pi N / 366 \\ N = 30(m - 1) + [(m + m / 8) / 2] \\ - [(m + 7) / 10] + n \end{cases}$$

()は、ガウス記号である。このようにして、太陽高度 α と方位角 β を計算し、パルスモーターを制御して太陽を追尾する。

計算機による太陽追尾の例は表2のように多数あり、その追尾精度は約±0.5度以下と高いが、計算機や配線のコストも高くなる。

2.2 センサ追尾

図-3は、光センサによる追尾方法を示す。1対の太陽電池セル(10×20mm)の間に直立した衝立板を設け、2枚のセルに発生した太陽の影による電気出力差を増幅し、モーターの回転方向を制御(太陽を追尾)する方式である。2軸追尾する場合には、さらに1対のセンサを追加すると、約±1度の精度で追尾できるが、曇天日には追尾が不可能である。

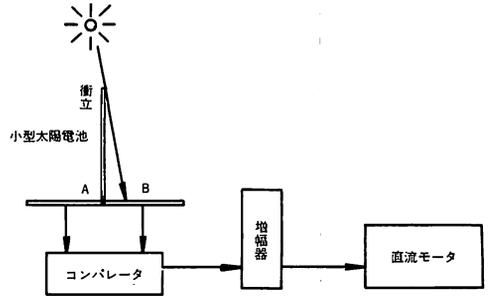


図-3 光センサによる太陽追尾機構

2.3 新追尾方法

新しい追尾方法として、影追尾用の太陽電池モジュールを追加した自己出力式追尾機構を紹介する。

図-4のように試作した影追尾光発電装置は、20枚の太陽電池モジュールを設置できる架台(アレイ)、太陽追尾用モジュール(3枚)、駆動用モーター(上下1対)と支柱(テンプレート付土台)で構成している。アレイを東西に2分割(各1,624×3,248mm)した理由は、南北方向の回転範囲を広くすると共に、耐風性を向上するためである。本実験の目的は、電池出力1kW級アレイに対し、新しい影追尾方法を試験して、その追尾精度など求めることである。

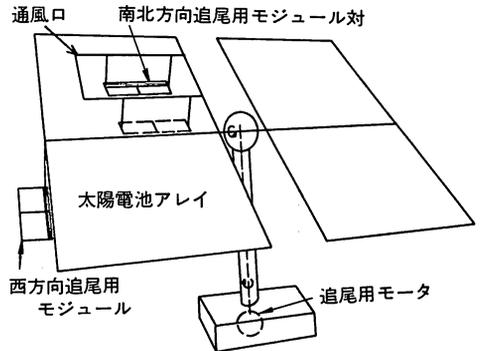


図-4 影追尾太陽電池を使用した追尾機構

3. 実施例

3.1 影追尾式アレイ

太陽電池モジュールは、1枚(面積0.5㎡)で日射量1kW/㎡(セル温度28℃)の時に定格50W(平均値)の電力を出力できる。負荷抵抗は、放熱フィン付巻線式であり、1.95Ω(15.6Ω, 8本)を用いた。

太陽の追尾には、追尾用太陽電池モジュールの影を追尾する方式を新しく採用した。東西方向に追尾するために、図-4に示すようにアレイの西側端の下部(アレ

イ面から1m下)にアモルファス太陽電池モジュール(面積0.12㎡, 出力5W)2枚を設置した。南北方向に追尾するためには、アレイに通風口を設置し、その下部1mに南北用補助モジュール1対を設けた。東西方向駆動モーターは、支柱下部の土台の内部に置き、支柱中のシャフトを回転する。南北追尾モーターは支柱上に設け、東西用と同様に定格回転数は2,000rpm、減速比は10,800である。

太陽を西方向に追尾するために、図-5のように追尾

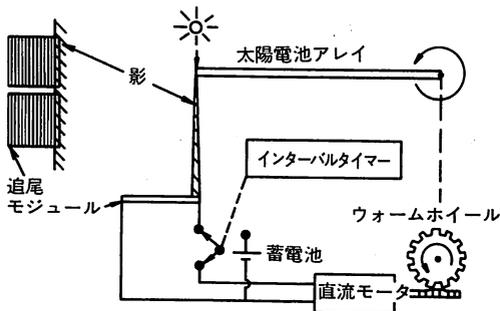


図-5 影追尾方法の原理

用太陽電池モジュール(補助パネル)をアレイの西側下部(アレイに平行)に設置した。アレイが太陽に直面している時は、モジュール上の一部分に影が発生し、その電気出力ではモーターは起動しない。太陽が西方に移動すると影が小さくなり、図-6と図-7に示すように電気出力が増加して直流モーターを回転するのである。さらに、アレイが太陽より速く回転すると、追尾パネル上の影が大きくなり、回転は停止する。追尾用モジュールの仕様は、小形(333×347mm)のアモルファスモジュールを2枚使用して、最大10Wの電力(日射量1kW/㎡, セル温度28℃)が出せる。直流モーターに対するインピーダンス整合に注意して、モーター起動時に出力が有効に発生するようにした。

追尾用モジュールからの出力も有効に利用するために、大部分の電気出力は蓄電池を充電するようにし、モーターは間欠的(図-8と図-9に示すように5分中20秒内)に作動させた。このスイッチの制御は、インターバルタイマ(電源は蓄電池)で行った。

南北方向の太陽追尾用に1対の太陽電池を設置し、午前中は太陽高度が高くなるので南側のパネル(図-4の通風口の南)を使用した。午後は通風口の北側(アレイの南北に設置する場合は南側)のパネルを使うが、太陽南中の11時40分にタイマ(蓄電池で作動)を使って自動的に切替えた。

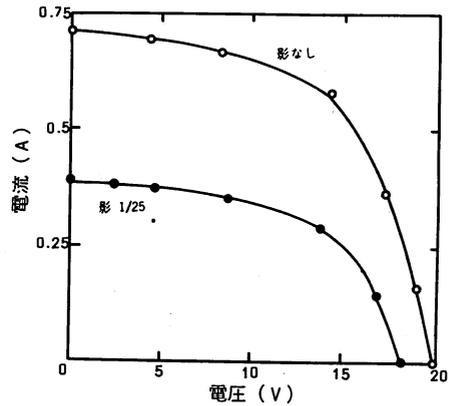


図-6 影追尾用アモルファス太陽電池

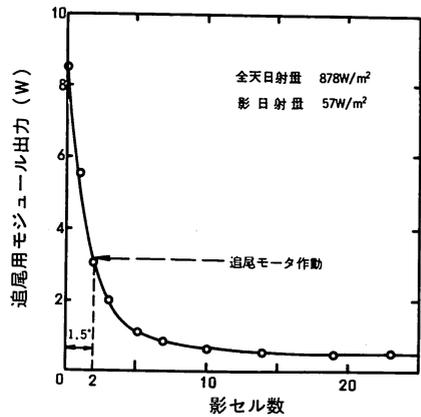


図-7 追尾用モジュール出力への影効果

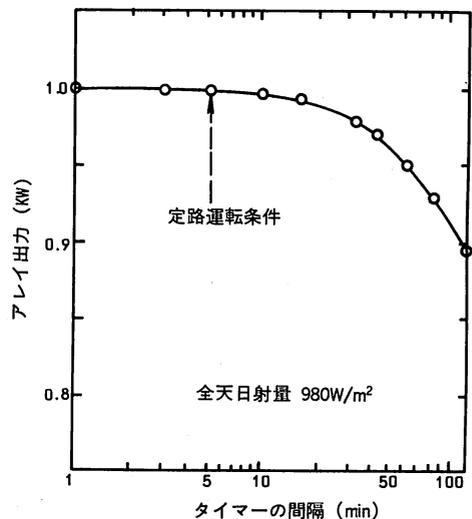


図-8 主アレイ出力とインターバルタイマの間隔

アレイは夜間には水平に設置しておき、強風への抵抗を少なくしている。朝日によって東方に向けて立上って太陽を追尾して、夕方7時にはスイッチが作動して東

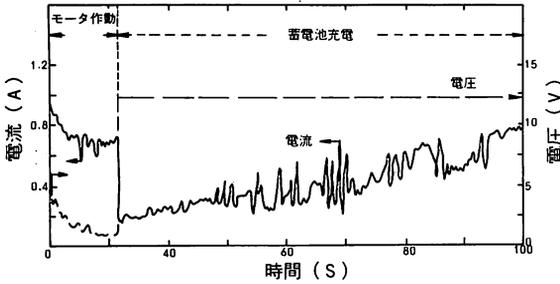


図-9 追尾用モジュール出力のトレンドデータ

方に逆回転して待機させた。

影追尾法の追尾誤差 ϵ は、タイムインターバルを τ (5 min), アレイとの距離を a (1 m), 追尾モジュール上の影幅を b (2.5cm) とすると,

$$|\epsilon| > 15^\circ \tau / 60 > \tan^{-1}(b/a) \dots\dots(5)$$

この誤差は ± 1.4 度であり、2軸追尾の場合は約 ± 2 度であって、平板形太陽電池モジュールに対して十分な精度である。

3.2 宇宙用集光式モジュール

宇宙空間では、現在では人工衛星に太陽電池モジュールを使用した 1 kW 級の光発電パドルが実用化している。1990年代には図-10 に示すような宇宙ステーションのパワーシステム用に、100kW 級の光発電パドルを米国を中心に開発中である。さらに、来世期の人類の主要電源として、1,000MW 級の S P S (Solar Power Station) を上空 35,700km に設置して、地上にマイクロ波で送電するシステムの研究が開始されている。これらの太陽電池の主流は平板形 (Si, GaAs) であるが、太陽を追尾 (2軸) しているので集光式モジュール (反射形, 透過形) が注目されてきた。

図-11 は、反射形モジュールの 1 例 (米 TRW 社) であり、太陽光を 2 回反射して集光比 100 で GaAs セル上に集めるため、宇宙での放射線によるセルの劣化が少い。図-12 は、集光比 4 の反射モジュールであり、反

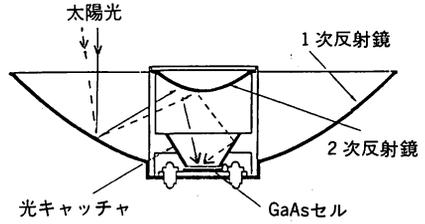


図-11 反射鏡集光式モジュール⁹⁾

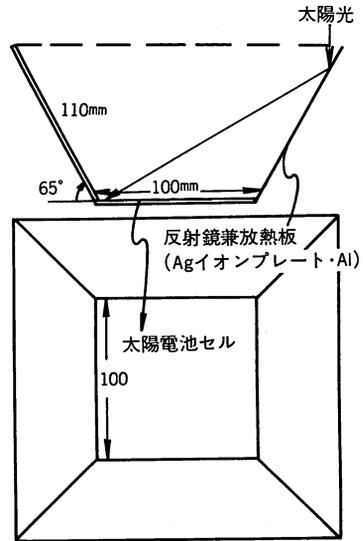


図-12 低集光比のモジュール

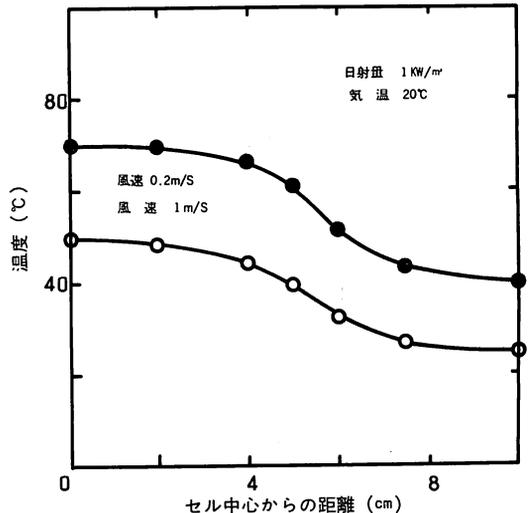


図-13 低集光形セルの温度分布

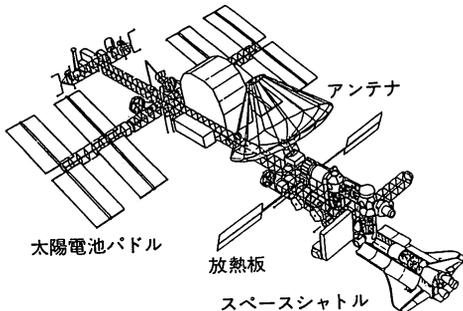


図-10 宇宙ステーションの構成

射鏡をアルミ製として放熱板を兼ねている。これは、地上でも使用できて、図-13 に示すように反射鏡が放熱板の役目もしており、低集光比だがコストも低下できる。図-14 は、フレネルレンズと全反射誘電体レンズ (Dielectric Concentrator) を組合せ、太陽電池に一

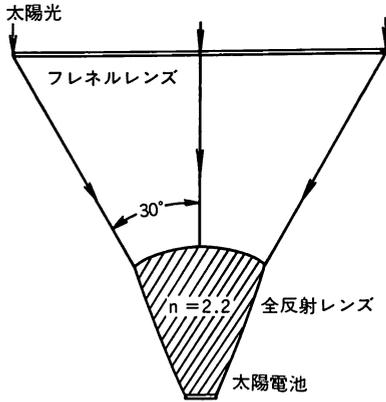


図-14 全反射レンズによる2次集光方式

様に光を照射している¹⁰⁾。

4. 追尾の効果

太陽追尾する太陽電池アレイへの年間日射量を固定アレイ(真南に30度傾斜)への日射量と比較するため、両者を水平面日射量の実測値から計算で求めた。水平面日射量としては、名古屋(昭和58年)のデータ(日間の積算日射量を名古屋気象台で記録した値)を使用した。各月の平均日間日射量Qの測定値と日射時間 t_0 を調査し、時角 t (4式)の水平面全天日射量 I_h を近代的に次式で計算した。

$$I_h = \frac{\pi Q}{2t_0} \cos(t/t_0) \dots \dots \dots (6)$$

傾斜面への全天日射量 I_p を計算するためには、直達日射量 I_d と水平面天空日射量 I_s (一様分布と仮定)に分割する。太陽光の入射角 i 、傾斜角(南方向 ν)、地表反射率 ρ を使うと、傾斜面日射量 I_p は近似的に次式で表わせる。

$$I_p = I_d \cos i + I_s (1 + \cos \nu) / 2 + \rho I_s (1 - \cos \nu) / 2 \dots \dots \dots (7)$$

太陽を追尾(2軸)した場合の全天日射量 I は(7)式において、

$$i = 0, \quad \nu = \pi / 2 - \alpha, \quad \varphi = \beta \dots \dots \dots (8)$$

として計算した。ここで α 、 β 、 φ は、それぞれ太陽高度(1式)、方位角(2式)、傾斜面東西傾角である。

図-15は、上記の方法によって、名古屋における昭和58年の各月別の全天日射量を、水平面 I_h 、30度傾斜面 I_p 、太陽追尾面 I の場合について比較した結果である。傾斜面日射量は、水平面日射量と比較すると、冬季には大きい値と示すが夏季には小さくなり、年間日射量は、水平面に対してよりも16%増加する。追尾し

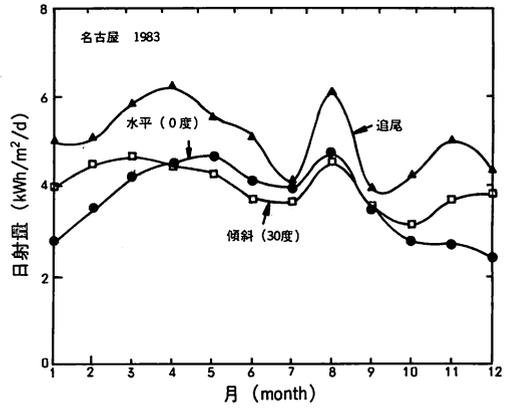


図-15 太陽追尾による日射量の増加

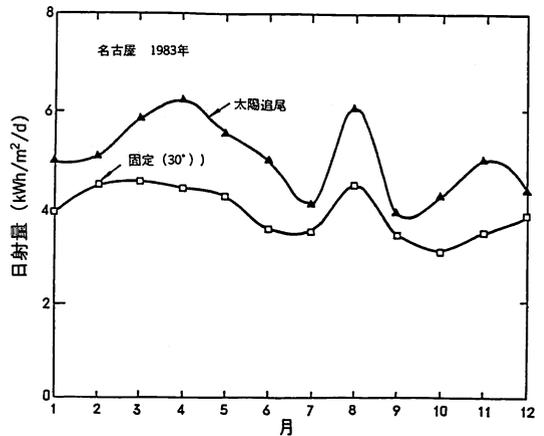


図-16 日射量(>100W/m²)の比較

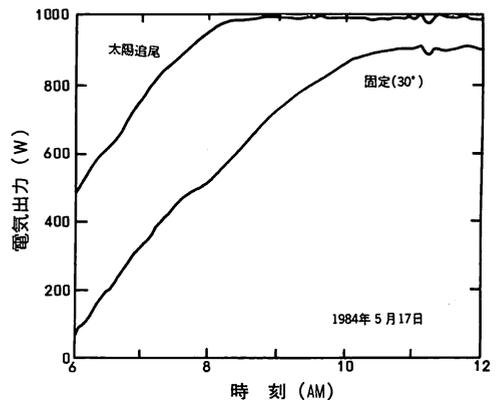


図-17 太陽追尾の晴天日での効果

たアレイへの日射量は、30度傾斜面日射量と比較すると晴天の多い月(5, 8, 10月)に特に大きくなり、年間積算でも22%増加することとなる。

図-16では、30度傾斜面日射量と追尾アレイ日射量に関して、100W/m²以上の日射量のみを積算して比較したものである。低い日射量の時には、インバータの

効率が低いためと、所内動力を節約するために光発電システムは運転しない場合が多いからである。この場合の追尾アレイへの年間日射量は、固定面(30度)への日射量より30%増加する。

図-17は、晴天日午前中のアレイ出力を、追尾しないモジュール(傾斜角30度)からの出力と比較した制定値であり(正午の日射量989W/㎡)、日間発電量の比は1.5倍であった。

5. おわりに

表2の、太陽追尾方式の比較表で示したように、新方式(太陽電池影追尾)を従来の計算機制御及びセンサ追尾と比較した。計算機制御方式は、太陽熱発電や大部分の追尾式光発電システムに採用しているように、各時刻の太陽位置をプログラム化して追尾する方法である。よって、追尾精度は約±0.5度以下と高いが、外部電源を必要とし、集中制御室から各ステップモーターへの配線が長く、コストが高くなる。センサ追尾は、4枚の光センサへの日射光信号をコンパレータに入力して、モーターを制御する方式である。この方法は、曇天日には使用できないが、晴天日に正確に追尾できるため、計算機制御のチェック用に採用する機会が多い。

太陽電池モジュールへの影追尾方式は、追尾誤差が約±2度と大きいですが、図-8に示したようにアレイ全体からの電気出力の減少は、正確に追尾した場合と比較して1%以内である。外部電源が必要なくて、インターバルタイマの消費電力は補助太陽電池モジュールからの出力を蓄積して使用する。本方式の特長は、制御装置が各太陽電池アレイごとに分散しているため、配線長が短くて、落雷などによる故障が各アレイに限定されることである。駆動モーターには安価な通常の直流モーターを使えることにもよって、数基のアレイで構成するシステムではコストが計算機方式より安くなる。

晴天日に本方式によって太陽を追尾した結果、アレイ出力は午前8時(5月)から午後4時まででは約1kWの一定値であり、固定アレイ(傾斜角30度)出力の1.5倍であった。100W/㎡以上の日射量に対しては、傾斜面(30度)全天日射量の年間積算値と比較して、太陽追尾した場合の日射量は1.3倍(名古屋)である。

宇宙空間や晴天の多い地上では、集光式モジュールを使うとコストが低下するため、反射式及び透過式のモジュールの開発が米国を中心に推進されている。集

光化の高いモジュールは計算機で正確に太陽を追尾する必要があるが、低集光比(非集光平板式を含む)の場合には影追尾式が適していると考えられる。

参考文献

- 1) Buresch, M.; Photovoltaic Energy Systems, McGraw-Hill, (1983).
- 2) Hart, G. W.; Residential Photovoltaic System Simulation, ASME Solar Energy Conference, (1982), 26~30.
- 3) Arnett, J. C.; Design Optimization of Tracking Photovoltaic Arrays, IEEE, ASME, IECEC, (1984), 2162~2166.
- 4) 片山正純 他; 太陽追尾システムの試作と動作特性, 電気学会全国大会, (1985), 1519.
- 5) Imani, K.; Photovoltaic Array with Shadow-following Modules for Sun-tracking Power and Control, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (1985), 12-G.
- 6) オーストラリア; 小規模農場向け太陽電池用太陽追尾装置, 太陽エネルギー学会誌, No. 6 (1985), 56.
- 7) 知念正紀 他; 将来型曲面集光式太陽熱発電システム, エネルギー・資源研究会 研究発表会, (1985).
- 8) Hamadto, S. et al.; Experience with Polygon Concentrators, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (1985), 10-G.
- 9) TRW: TRW Solar Array, T-88969, (1984).
- 10) O'Gallagher, J. et al.; Nonimaging Dielectric Elements in Second-Stage Concentrators, American Solar Energy Society 1983 Meeting, (1983).

