

正午に1回の方位角切替による 太陽光発電電力の増加

Performance Improvement of Generated Energy of PV System by a
Changing of Azimuth Angle at Noon

田中 芳夫 *¹
Yoshio TANAKA

藤本 憲市 *²
ken-ichi FUJIMOTO

Abstract

We have developed an equatorial sun tracking system and installed it on the rooftop of the building of the AIST Shikoku at Takamatsu city. The tracking system with a flat plate non-concentrating solar cell module and a pyranometer has several tracking modes controlled by a programmable controller. In our previous paper, we discussed the increasing effect of the generated energy for two complete years data under three types of tracking mode. The measurements for the power, the temperature of the solar cell module and the global solar irradiance have been continued under the simplest tracking mode by which the angle of direction is only changed at noon since 1997.

We discuss the effect of the changing of the angle of azimuth and tilt on the increasing of generated energy for six complete years data. The only change of azimuth angle at noon yields a 16% energetic advantage; and furthermore the seasonal change of tilt angle yields extra 2% energetic advantage, relative to conventional stationary construction.

キーワード：太陽光発電，非集光型平板太陽電池モジュール，発電電力量，太陽追尾，方位角切替

Key Words：Photovoltaic, Flat plate non-concentrating solar cell module, Generated energy, Sun tracking, Changing of azimuth angle

1. はじめに

近年，地球温暖化防止のために化石燃料などによるCO₂削減が課題となるなか，環境への負荷の小さい有力な自然エネルギー源の一つとして，風力発電と共に，太陽光発電が脚光を浴びている。太陽電池によって太陽エネルギーを直接電気に変換する太陽光発電システムは，入力である太陽光線が無料かつ无尽蔵である上に，システム自身に可動部がないため静かでクリーンかつ保守が簡単，設置規模に関係なく一定効率で発電できるなど，未来のエネルギー源として個人住宅レベルで大規模な普及の期待できる数多くの特徴を有している⁽¹⁾。この太陽光発電の個人住宅への普及促進に関しては，1994年に始まった新エネルギー財団による住宅用太陽光発電システムモニター事業の他，市民組織や地方公共団体が系統連系方式だけでなく独立系のシステムに対しても補助金制度を設けるなど，活発な活動が展開されている^{(2) (3)}。より一層の個人住宅用太陽光発電の普及には，屋根がなくても太陽電池モジュール1枚から利用できるシステム，いわゆるベランダ太陽光発電システムの開発や日々の生活と密接に関連したデータ収集が重

要であることも指摘されている⁽³⁾。

筆者らは，既報⁽⁴⁾において，プログラム制御できる太陽追尾装置と最大電力追従制御を行う電力測定装置を用いて，現在一般的に住宅用太陽光発電システムに利用されている非集光型平板太陽電池モジュールの設置方位角（時角）を1日に数回変更する簡易追尾や完全追尾など，各種追尾方式の南中方向年間最適傾斜角固定設置に対する電力増加効果について，2年間の実測データに基づいて考察を行った。その結果，非集光型平板太陽電池モジュールの場合，完全追尾をしなくても季節ごとの傾斜角調整と正午に1回のみ時角を変更するだけで，完全追尾とはほぼ同等の発電電力量の増加効果（年平均で，年間最適傾斜角固定の1.2倍程度）が見込めることを報告した。この正午に1回のみ設置方位角（時角）を変更するという簡易追尾動作は，機構的に手動動作でも容易に実現可能であり，モジュール1枚から数枚程度を利用するベランダ太陽光発電などにおいて，コストをかけずに発電量を向上させる非常に有効な追尾型の設置方法と考えられる。そこで，筆者らは，既報⁽⁴⁾において考察を行った3種類の追尾方式の内，正午に1回のみ設置方位角（時角）を変更する簡易追尾方式について，その後6年間という長期間に渡り，試作した太陽追尾装置を用いた実測データの収集を継続した。

本論文では，この正午に1回のみ方位角を変更する簡易追尾方式の有効性を6年間という長期間のデータで実証し，また，ベランダ太陽光発電システムなどの小規模シス

*¹ 産業技術総合研究所四国センター・主任研究員
(〒761-0395 香川県高松市林町2217-14)
e-mail: yo-tanaka@aist.go.jp

*² 阿南工業高等専門学校電気電子工学科・講師
(原稿受付：2003年7月31日)

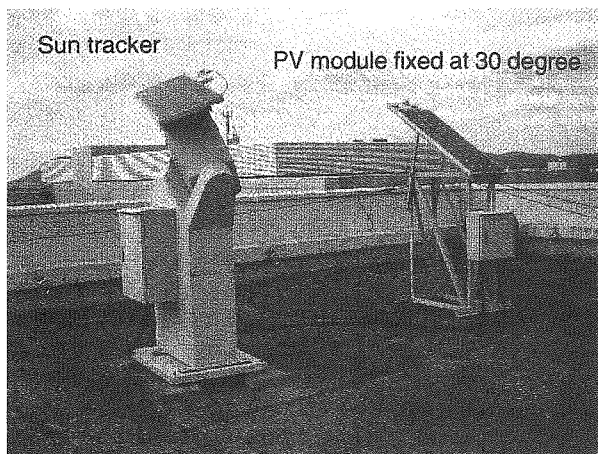


Fig.1 Sun tracker and PV module fixed at optimal angle
図1 太陽追尾装置と最適傾斜角固定モジュール

Table 1 Specification and standard characteristics of PV module
(Condition: AM 1.5, Cell temperature 28 °C, Power density of solar irradiance 1.0 kW/m²)

表1 太陽電池モジュールの仕様と標準時発電特性

Solar cell element	Single crystal silicone
Maximum power output [W]	66.0
Short-circuit current I_{sc} [A]	3.12
Open-circuit voltage V_{oc} [V]	27.8
Optimal point current I_{op} [A]	2.89
Optimal point voltage V_{op} [V]	22.8
Conversion efficiency [%]	11.9
Size of PV module [mm]	1290 x 430 x 35
Weight of PV module [kg]	7.8

テムにおける発電電力増加のための簡易追尾方式検討のための基礎データを提供するため、電力増加効果などを季節ごとに集計した結果について報告する。

2. データ収集の概要

2.1 計測システム

既報⁽⁴⁾において詳細を報告した赤道儀型の太陽追尾装置を用いて、午前中は10時の時角、午後は14時の時角へと正午に時角を変更する簡易追尾動作（以後、方位角切替と記述する）を6年間行った。太陽追尾装置には、単結晶シリコンの非集光型平板太陽電池モジュール1枚と全天日射量計（英弘精機製MS-801）を搭載している。簡易追尾の対比システムとして、南中方向、傾斜角30°の固定架台（高松市年間最適傾斜角⁽⁵⁾29.5°）を設置し、追尾装置に搭載したのと同じ仕様の太陽電池モジュールと全天日射量計を搭載した。図1に太陽追尾装置と南中方向傾斜角30°に固定した対比システム（以後、南中固定モジュールと記述する）の外観、表1に搭載した太陽電池モジュールの仕様を示す。なお、今回のデータ収集に使用した太陽電池モジュールは1985年に製造され、1MW級西条太陽光発電シ

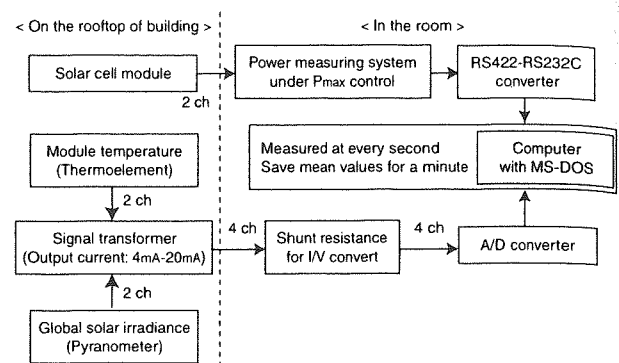


Fig.2 Configuration of automated data acquisition system
図2 データ自動収集システムの構成

ステム⁽⁶⁾に使用されていたものをプロジェクト終了後一部譲り受けたものであり、本論文のデータ収集を開始した1997年時点ですでに10年以上経過したものである。また、太陽追尾装置は機構上、傾斜角調整（赤緯追尾）を常時行う構造になっている。

既報⁽⁴⁾と同様に、モジュール1枚の最適動作点を山登り法で追尾する P_{max} 制御を100ms周期で行うマイコンを搭載した試作電力測定装置を用いて直流出力（電圧、電流、電力）、T型熱電対を用いてモジュール裏面温度、全天日射量計を用いて追尾面と南中方向30°固定面における傾斜面全天日射量を計測した。これら計測データの収集は、MS-DOSパソコンのタイマー割り込み機能により5時から20時までの間、1秒間隔で行い、1分間の平均値をパソコンのハードディスク内に保存する構成になっている。データ自動収集システムの構成を図2に示す。

2.2 典型的天候の1日の発電電力例

図3は春分の日に近い春の快晴日における各時刻の発電電力を示している。方位角切替を行う場合、当然ながら2つの時刻（10時と14時）近傍をピークとする双峰性の発電形状となる。その発電電力量増加効果は、図3のグラフの数値積分により、30°固定に対して1.23倍となった。た

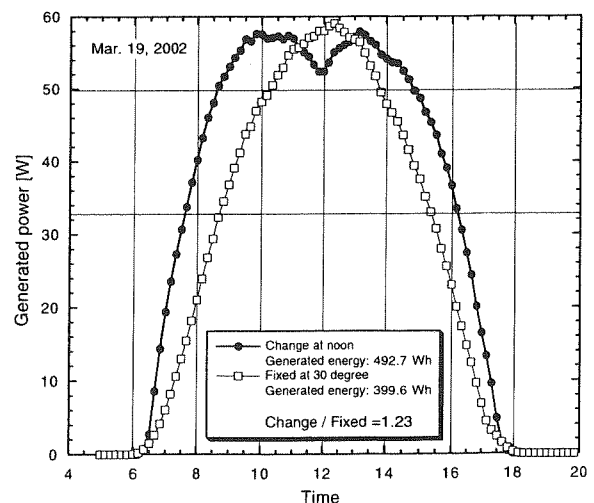


Fig. 3 Typical pattern of generated power under fine weather
図3 快晴日における典型的な発電電力形状

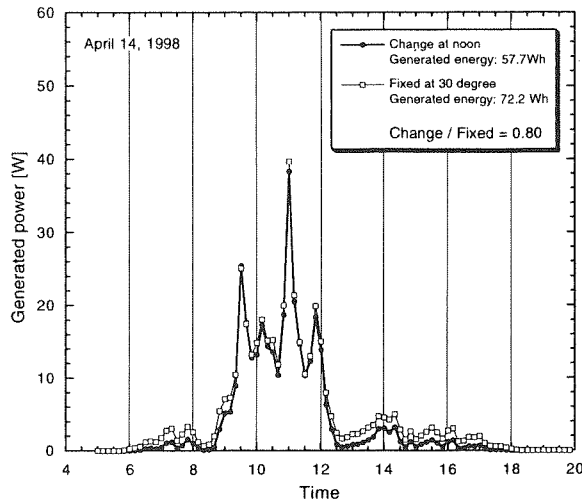


Fig. 4 Generated power under cloudy weather
図4 曇天日における発電電力形状

だし、本例の場合13時30分から14時30分にかけての太陽電池モジュール裏面温度のピークに起因する発電効率の低下により顕著なピークが14時に見られなくなっている。また、太陽電池モジュールの製造時仕様書値における最大出力(66W)の75%値に相当する50W以上の電力を発電できる時間帯が方位角切替の場合6時間8分(南中固定モジュール:3時間30分)、50%値に相当する33W以上の電力を発電できる時間帯が方位角切替の場合8時間32分(南中固定モジュール:6時間37分)となり、一定量以上の発電電力を確保できる時間帯が2時間以上増加することもわかる。なお、図3において発電電力50Wと33Wを示す横線は、各々、計測に使用した太陽電池モジュールの最大出力の75%値と50%値に対応する。

図4は追尾装置の赤緯がほぼ30°となり、南中固定モジュールと同じ傾斜角となる春の曇天日の各時刻の発電電力を示している。この例では、快晴ならば方位角切替の方が明らかに発電電力が多くなる時間帯、すなわち10時以前や14時以降においても、南中固定モジュールの方が若

干発電電力が多くなることを示している。この日のように発電に寄与するのがほとんど散乱光であると思われる曇天や雨天の場合、全方位からの散乱光をより獲得しやすい姿勢である南中方向に固定すればよいことを示している。

3. データの集計と考察

データの収集は、1997年2月から2003年1月までの6年間実施した。このうち、収集システムのトラブルのあった2000年4月、5月のデータは欠落している。なお、先に述べたとおり、太陽追尾装置は機構上、傾斜角調整(赤緯追尾)を常時行う構造になっているため、測定を開始した2年目の1年間(1998年2月～1999年1月)は傾斜角調整のみの効果を検証するために、1ヶ月のうち月後半15日間は南中停止・赤緯追尾のみの動作制御モードに切り替えて、データ収集を行った。

図5は、月別の1日あたりの発電電力量の変化の様子を示している。図中の印無し実線は、方位角切替と南中固定モジュールの発電電力の差を表している。方位角切替を行う場合の方が、いずれの月も1日あたりの発電電力量は多く、その差は平均値で40.7Wh/day(最大71.7Wh/day、最小16.0Wh/day)であった。ただし、この値には、追尾装置の傾斜角調整の影響が含まれていることに注意されたい。

図6は、月別のモジュール裏面温度の変化の様子を示している。図5と同様に、図中の印無し実線は、方位角切替と南中固定モジュールの温度差を表している。方位角切替を行う場合の方が、いずれの月も月平均裏面温度は若干高く、その差は平均値で1.9℃(最大3.3℃、最小0.8℃)であった。ただし、この値にも追尾装置の傾斜角調整の影響が含まれていることに注意されたい。

表2は、太陽追尾装置を南中停止・赤緯追尾のみの動作制御モードとした期間の収集データを季節ごとに整理したものである。当然ながら、太陽電池モジュール設置面における全天日射量計による測定値(傾斜面全天日射量)は、南中時に直達光が垂直に入射する赤緯追尾の場合が南中固

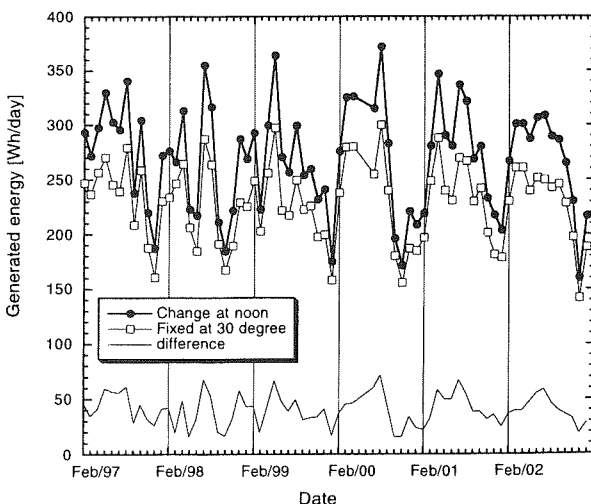


Fig.5 Monthly average of generated energy per day
図5 一日あたりの発電電力量の月別変化

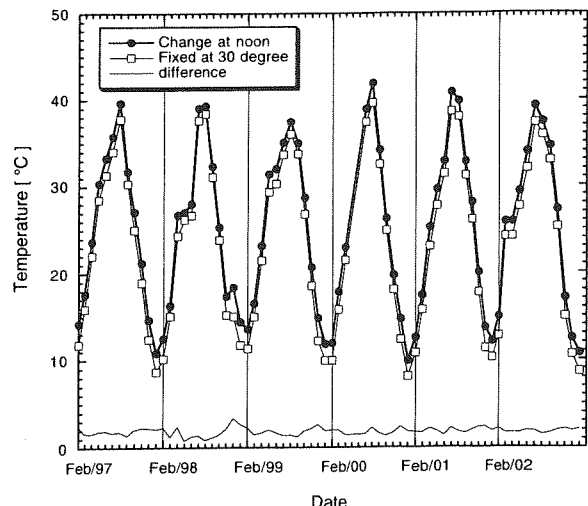


Fig.6 Monthly average of temperature of PV module
図6 モジュール裏面温度の月別変化

Table 2 Effect of the declination tracking for February, 1998 to January, 1999
表2 赤緯追尾の効果 (1998年2月 - 1999年1月)

		Mar.-May	June-Aug.	Sept.-Nov.	Dec.-Feb.	Year-round
Generated energy	Increased ratio (change tilt angle/fixed)	1.00	1.03	0.99	1.05	1.02
	Average of measured data for fixed system [Wh/(day・module)]	259.3	243.9	202.9	197.5	225.3
Total solar irradiance	Increased ratio (change tilt angle/fixed)	1.04	1.06	1.04	1.11	1.06
	Average of measured data for fixed system [kWh/m ² day]	4.76	4.86	3.83	3.69	4.28
Temperature of PV module	Increased value from fixed system [°C]	0.0	0.0	0.4	1.3	0.4
	Average of measured data for fixed system [°C]	25.7	35.3	27.1	12.5	25.1
The number of data [day]		40	45	42	45	172

Table 3 Seasonal feature of measured data for February, 1997 to January, 2003
(The change of angle of direction once a day at noon vs. fixed at optimal angle and southern direction)
表3 1日1回正午の時角変更と年間最適傾斜角との比較 (1997年2月 - 2003年1月)

		Mar.-May	June-Aug.	Sept.-Nov.	Dec.-Feb.	Year-round
Generated energy	Increased ratio (change azimuth angle/fixed)	1.17	1.18	1.17	1.11	1.16
	Average of measured data for fixed system [Wh/(day・module)]	256.1	251.0	212.4	198.4	229.1
Total solar irradiance	Increased ratio (change azimuth angle/fixed)	1.14	1.16	1.13	1.09	1.13
	Average of measured data for fixed system [kWh/m ² day]	4.56	4.77	3.88	3.36	4.14
Temperature of PV module	Increased value from fixed system [°C]	1.7	1.7	1.4	0.8	1.4
	Average of measured data for fixed system [°C]	22.1	35.1	25.0	10.9	23.3
The number of data [day]		456	457	496	454	1863

定モジュールよりいずれの季節も多くなり、その値は年平均値で南中固定モジュールの1.06倍になった。この結果は、1991年に電気学会太陽エネルギー技術利用調査専門委員会によりまとめられた月別の最適傾斜角日射量と年間最適傾斜角日射量を比較した結果（年平均値で約5%の利得がある）⁽⁷⁾ によく一致している。一方、発電電力量は、赤緯が年間最適傾斜角30°近傍にある春と秋には赤緯追尾を行う場合と南中固定モジュールはほぼ同じであり、赤緯追尾の効果（太陽追尾装置が常時赤緯追尾をしている影響）はないといえる。また、赤緯と南中固定モジュールの傾斜角度との差が大きくなる夏と冬は、発電電力量にかなりの差が生じ、その割合は3%～5%になった。

表2からわかるように、傾斜面全天日射量の赤緯追尾による増加割合に対して、搭載した非集光型平板太陽電池モジュールの発電電力量の赤緯追尾による増加割合は、いずれの季節も3%～6%ほど低下している。この原因については、太陽電池モジュールの表面ガラスの透過率と反射率の分光特性によるものと考えられる。ちなみに今回の太陽電池モジュールの表面ガラスは、仕様書によると白板ガラ

ス（厚さ3.2mm）、光透過率90%以上である。また、太陽電池モジュールの裏面温度の増加は、最も差のあった冬で1.3℃、年平均値で0.4℃程度であった。

表3は、1日1回正午に時角変更をする方位角切替と南中方向年間最適傾斜角30°固定（南中固定モジュール）の場合の6年間の収集データを季節ごとに整理したものである。太陽追尾装置が常時赤緯追尾をしている影響を補正するために、年間最適傾斜角に対する方位角切替を行う場合の発電電力量と日射量の増加割合は、表2の赤緯追尾の効果の増加割合で除した値になっている。また、太陽電池モジュールの裏面温度の増加量は、表2の値を差し引いている。表3から、1日あたりの発電電力量に及ぼす方位角切替の増加効果は、春から秋にかけての日射時間の長い夏場に17%～18%程度、また年平均値で16%（赤緯追尾も行う場合は18%†）あることがわかる。また、モジュール裏面温度の上昇については、年平均で1.4℃であり、赤緯追

†表3と表2の通年の電力増加割合を逆処理（乗算）することにより、 $1.16 \times 1.02 = 1.18$ となる。

尾の影響を含めても年平均で1.8℃だけ方位角切替の場合が高くなる程度であった。この赤緯追尾効果も含めての発電電力量の増加割合が年平均値18%という数値は、既報で推定した約2割(季節ごとに1回傾斜角調整をしつつ毎日方位角切替を行う場合)より若干少ない値であった。しかし、本数値は10年以上を経過した太陽電池モジュールを使用しての6年間にわたる長期間の実測データに基づいて算出されたものであり、1日1回の方位角切替という簡単な操作が発電電力量の増加にかなり効果があることを実証的に裏付ける基礎的根拠になるものである。

4. おわりに

非集光型の平板太陽電池モジュールに対して、1日1回方位角切替を行う簡易太陽追尾方式の南中方向年間最適傾斜角設置に対する発電電力量増加効果について、6年間の実測データをもとに考察した。主な結果は以下の通りである。

(1) 1日1回 正午に10時の時角から14時の時角へと方位角切替を行えば、年平均16%程度の発電電力量増加が期待できる。

(2) 季節ごとに1回程度の傾斜角調整を行えば、さらに2%程度の増加が見込まれ、方位角切替との相乗効果で発電電力量の増加割合は18%程度になる。

(3) 発電に寄与するのがほとんど散乱光であるような曇天や雨天の場合、南中方向固定と方位角切替による発電電力量の差はほとんど無視できる程度である。したがって、このような天候時には、方位角切替を行う必要性はない。

今回、筆者らは電動式の追尾装置を利用してデータ収集と解析を行ったが、この1日1回の方位角切替操作は、ベ

ランダ太陽光発電のような数枚のモジュールを利用するシステムを設置する場合、方位角を二方向に変更できる手動式の方位角切替装置を考案すれば、コストをかけずに容易に実現可能と思われる。また、(3)で述べた結果から雨天などの場合、方位角切替操作はしなくてもよいことになり、このことは、雨中での操作が要求されるような手動式の方位角切替装置を利用するような場合にきわめて好都合な特徴であると思われる。さらに、1日1回の方位角切替操作は、手動式でも負担感なしに実行でき、太陽光発電への個人の参画意識を高める上でさらなる効果も期待できるかも知れない。以上の点から、いわゆるベランダ太陽光発電などに対して、1日1回の方位角切替操作を容易に行える設置方式が考案され、更なる検討と各地でのデータ蓄積が行われることを期待する。

参考文献

- (1) 濱川圭弘, 21世紀文明と新エネルギー, 応用物理, 67-9 (1998), 1023-1028.
- (2) 渋谷典明, 住宅用太陽光発電システム, 応用物理, 67-9 (1998), 1082-11086.
- (3) 都筑建, 市民が支える太陽光発電システムの普及, 太陽エネルギー, 28-6 (2002), 11-18.
- (4) 田中芳夫・田中正人・住友敬, 太陽追尾装置による太陽光発電システムの発電量の比較, 太陽エネルギー, 24-1 (1998), 56-61.
- (5) 黒川浩助・若松清司, 太陽光発電システム設計ガイドブック (1994), 208-213, オーム社, 東京.
- (6) 高橋昌英, 1 MW級西条太陽光発電システムに関するあれこれ話し, 太陽エネルギー, 26-4 (2000), 70-79.
- (7) 太陽エネルギー技術利用調査専門委員会, 太陽エネルギー技術の基礎と応用・基礎編, 電気学会技術報告, 379 (1991), 3-11.